

การพัฒนาวัสดุอีพอกซีโพลีเมอร์จากถั่วลอ่ย แคสซีนเกาลิน
และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์



นายณัฐพงศ์ ผาจันทร์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2561

**DEVELOPMENT OF GEOPOLYMER MATERIAL
FROM FLY ASH, CALCINED KAOLIN AND
PORTLAND CEMENT**



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Ceramic Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2019**

การพัฒนาวัสดุอีโพอติเมอร์จากถั่วลย แคลไซน์เกลลิน
และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

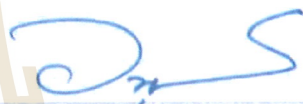
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(รศ. ดร.สุทิน คูหาเรืองรอง)

ประธานกรรมการ



(ผศ. ดร.อนูรัตน์ ภูวนาคำ)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(ผศ. ดร.อ่อนลณี กมลอินทร์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.จิรัชญา อายะวรรณา)

กรรมการ



(ศ. ดร.สันติ แม่นศิริ)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

และพัฒนาความเป็นสากล



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐพงศ์ ผาจันทร์ : การพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย แคลไซต์ แกลีน และ
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (DEVELOPMENT OF GEOPOLYMER MATERIAL FROM
FLY ASH, CALCINED KAOLIN AND PORTLAND CEMENT) อาจารย์ที่ปรึกษา :
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรัตน์ ภูวนาคำ, 71 หน้า

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement ,OPC) เป็นหนึ่งในวัสดุหลักที่สำคัญที่
ได้รับความนิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุดในโลก แต่ในปัจจุบันปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
เป็นวัสดุที่ไม่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากกระบวนการในการผลิตปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้น
ต้องใช้พลังงานความร้อนสูงและมีการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ออกสู่ชั้นบรรยากาศ
จำนวนมาก นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามพัฒนาวัสดุที่มีชื่อว่า จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) ซึ่งเป็น
วัสดุทางเลือกใหม่ที่ได้รับการสนใจมากในปัจจุบันเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถ
สังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่มีสารประกอบอะลูมิเนียม ซิลิเกตเป็นองค์ประกอบรวมถึงเถ้าลอย
คุณภาพสูงที่นิยมนำมาเป็นวัตถุดิบหลักในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์ซึ่งจะให้ความแข็งแรงที่สูง
และที่ผ่านมายังไม่มีงานวิจัยใดที่ใช้เถ้าลอยคุณภาพต่ำเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์
ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาจีโอพอลิเมอร์ให้สามารถบ่มที่อุณหภูมิห้องโดยได้ใช้วัตถุดิบ
จากเถ้าลอยคุณภาพต่ำและแคลไซต์แกลีนเป็นสารตั้งต้น

ผลการศึกษาพบว่า เพื่อให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงสูงจำเป็นต้องเติม
ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เล็กน้อยร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะสามารถทำให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์
ได้มีความแข็งแรงมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และสามารถบ่มจีโอพอลิเมอร์ได้ที่อุณหภูมิห้อง
เนื่องจากความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Hydration) เพียงพอต่อการเกิดกระบวนการ
จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymerization process)

วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ปราศจากการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์จำเป็นต้องใช้ความร้อนจาก
ภายนอกในการบ่มเพื่อให้ได้ความแข็งแรงที่เหมาะสมต่อการใช้งาน หลังจากบ่มที่อุณหภูมิ 60
องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน จีโอพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยเถ้าลอยและแคลไซต์แกลีนในสัดส่วน
1:1 โดยน้ำหนักมีค่ารับกำลังแรงอัด 42 MPa ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้งานทางด้านวิศวกรรม

องค์ความรู้จากงานวิจัยนี้ เผยให้เห็นถึงวิธีการนำเถ้าลอยซึ่งเป็นของเสียที่เป็นพิษมาพัฒนา
ให้เป็นวัสดุที่มีมูลค่า

สาขาวิชา วิศวกรรมเซรามิก
ปีการศึกษา 2561

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

NUTTAPONG PHACHAN: DEVELOPMENT OF GEOPOLYMER
MATERIAL FROM FLY ASH, CALCINED KAOLIN AND PORTLAND
CEMENT. THESIS ADVISOR : ASST.PROF. ANURAT POOWANCUN,
Ph.D., 71 PP.

GEOPOLYMER/GEOPOLYMERIZATION/FLY ASH/CALCINED KAOLIN/PORTLAND
CEMENT

Ordinary Portland Cement (OPC) is one of the most used materials in the world. However, OPC is an environmentally unfriendly material. The production process of OPC requires high energy consumption and releases large amounts of carbon dioxide (CO₂). Geopolymer is an excellent candidate for using as a cement replacement material. Geopolymer can be synthesized from various kinds of aluminosilicate materials including fly ash. However, only high-quality fly ash is used to develop high strength geopolymer. There is not any technology for developing geopolymer from fly ash (FA). The aim of this work is to develop the room temperature curing geopolymer by using FA and metakaolin (MK) as the precursors.

The results show that the addition of small amounts of OPC is required for obtaining the high strength of FA-MK-geopolymer. By adding tiny amounts of OPC, i.e., 5 weight%, the strength of FA-MK-Geopolymer is higher than that of OPC after curing at room temperature. The heat generated from cement hydration is sufficient for the geopolymer hardening process (geopolymerization process). However, the external heat curing is required to obtain the high strength FA-MK-geopolymer which lack of the OPC addition.

After curing at the 60 °C for 7 days, FA-MK-geopolymer that contain FA/MK in the ration of 1:1 by weight obtain the strength of 42 MPa which sufficient for engineering application.

The knowledge of this research reveals the method for utilizing the hazardous waste, i.e., FA as a valuable material.



School of Ceramic Engineering

Academic Year 2018

Student's Signature

Advisor's Signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ด้วยการสนับสนุน ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีและบุคคลที่กรุณาให้ความสนับสนุนอย่างดียิ่งในทุกด้าน ดังนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุรัตน์ ภูวานคำ อาจารย์ประจำมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำปรึกษา คำแนะนำ พร้อมทั้งช่วยแก้ปัญหา และให้ความอนุเคราะห์เรียบเรียงตรวจสอบความสมบูรณ์ของเนื้อหาในงานวิจัยเล่มนี้

คณาจารย์ทุกท่านในสาขาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความเมตตาอบรม และให้ความรู้กับผู้วิจัยมาโดยตลอด

คุณพันทิพา นำสว่างรุ่งเรือง ที่ให้ความช่วยเหลือและประสานงานทางด้านเอกสารตลอดระยะเวลาที่ศึกษา รวมถึงเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ศูนย์เครื่องมือมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกทางด้านเครื่องมือให้กับผู้วิจัย

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้เปิดโอกาสทางการศึกษา และให้ความช่วยเหลือในทางเครื่องมือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ คุณแม่ อรุณผาจันทร์ มารดาผู้ให้กำเนิดและให้ทุกสิ่ง ให้ความรัก ความอบอุ่น คำแนะนำและกำลังใจที่สำคัญ

คุณประ โยชน์อันใดที่เกิดขึ้นจากงานวิจัยครั้งนี้ย่อมเป็นผลจากความกรุณาจากทุกท่านที่ได้กล่าวนามมาข้างต้น จนผู้วิจัยดำเนินการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงได้ ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ณัฐพงศ์ ผาจันทร์

สารบัญ

หน้า

| | |
|--|----------|
| บทคัดย่อ (ไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (อังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ | ค |
| สารบัญ..... | ง |
| สารบัญตาราง..... | ฉ |
| สารบัญรูป..... | ญ |
| บทที่ | |
| 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย | 2 |
| 1.3 ขอบเขตการวิจัย | 3 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 3 |
| 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 4 |
| 2.1 จีโอพอลิเมอร์ | 4 |
| 2.1.1 สมบัติทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์..... | 4 |
| 2.1.2 การทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์..... | 5 |
| 2.1.2.1 กระบวนการชะละลาย..... | 5 |
| 2.1.2.2 ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน | 6 |
| 2.1.3 ความแตกต่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ | 7 |
| 2.2 ปูนซีเมนต์ | 8 |
| 2.2.1 องค์ประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ | 8 |
| 2.2.2 สมบัติของสารประกอบหลัก | 10 |
| 2.2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง..... | 11 |
| 2.2.2.2 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สอง | 11 |
| 2.2.2.3 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สาม | 11 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|-----------|
| 2.2.2.4 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่สี่ | 11 |
| 2.2.2.5 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ห้า..... | 11 |
| 2.3 เถ้าลอย | 12 |
| 2.3.1 สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย | 12 |
| 2.3.2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย..... | 13 |
| 2.3.3 ลักษณะรูปร่างเถ้าลอย | 13 |
| 2.3.4 ขนาดและความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย..... | 14 |
| 2.3.5 การหาดัชนีการพัฒนากำลังของเถ้าลอย | 14 |
| 2.3.6 ความต้องการน้ำ | 15 |
| 2.3.7 ความสม่ำเสมอ | 15 |
| 2.3.8 แฟกเตอร์ผลคูณ..... | 15 |
| 2.4 ดินขาว..... | 16 |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 17 |
| 3 วิธีดำเนินงานวิจัย..... | 21 |
| 3.1 อุปกรณ์การทดลอง | 21 |
| 3.1.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ด | 22 |
| 3.1.2 โซเดียมซัลไฟด์ชนิดสารละลาย..... | 22 |
| 3.2 การดำเนินการทดลอง | 22 |
| 3.2.1 การเตรียมเถ้าลอยและแคลไซต์แกลีน | 24 |
| 3.2.2 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและแคลไซต์แกลีน | 24 |
| 3.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของเถ้าลอยและแคลไซต์แกลีน..... | 25 |
| 3.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะและรูปร่างของเถ้าลอย..... | 26 |
| 3.2.5 การเตรียมตัวอย่างสำหรับใช้ทำปฏิกิริยา..... | 27 |
| 3.2.6 การขึ้นรูปชิ้นงาน..... | 28 |
| 3.2.7 การวัดเวลาในการก่อตัว | 28 |
| 3.2.8 การทดสอบกำลังรับแรงอัด | 29 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|--------|---|----|
| 3.2.9 | การวัดความหนาแน่น..... | 31 |
| 3.2.10 | การศึกษาผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อ สมบัติของจีโอพอลิเมอร์ | 32 |
| 3.2.11 | การทดสอบคุณสมบัติที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์..... | 32 |
| 3.2.11 | การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์..... | 33 |
| 4 | ผลการทดลองและอภิปรายผล | 34 |
| 4.1 | ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเคมีของถ้ำลอยและแคลไซต์ในกาลิน | 33 |
| 4.2 | ผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของถ้ำลอย..... | 35 |
| 4.3 | ผลการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบทางเฟสของถ้ำลอย และแคลไซต์ในกาลิน | 35 |
| 4.4 | ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของ จีโอพอลิเมอร์..... | 37 |
| 4.4.1 | ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัด ของจีโอพอลิเมอร์..... | 37 |
| 4.4.2 | ผลความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาการ ก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ | 38 |
| 4.5 | ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ | 39 |
| 4.5.1 | ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ | 39 |
| 4.5.2 | ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์..... | 41 |
| 4.6 | ผลการแทนที่ถ้ำลอยด้วยแคลไซต์ในกาลินต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ | 41 |
| 4.6.1 | ผลการแทนที่ถ้ำลอยด้วยแคลไซต์ในกาลินต่อค่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ | 42 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|---|----|
| 4.6.2 | ผลการแทนที่ที่ละลายด้วยแคลไซต์ในกาลินต่อ เวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์..... | 43 |
| 4.7 | ผลการแทนที่ผงจีโอพอลิเมอร์ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์..... | 44 |
| 4.7.1 | ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังรับแรงอัด และเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์..... | 45 |
| 4.7.2 | ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อความหนาแน่น ของจีโอพอลิเมอร์..... | 47 |
| 4.7.3 | ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อโครงสร้างจุลภาค (Microsturctur) ของจีโอพอลิเมอร์..... | 48 |
| 5 | สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 50 |
| 5.1 | สรุปผลการวิจัย..... | 50 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ..... | 51 |
| | รายการอ้างอิง..... | 52 |
| | ภาคผนวก ก บทความที่ทางวิชาการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างเรียน..... | 58 |
| | ภาคผนวก ข การคำนวณสัดส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม..... | 67 |
| | ประวัติผู้เขียน..... | 71 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|----------|---|
| 2.1 | องค์ประกอบหลักและร่องทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์..... 9 |
| 2.2 | ข้อกำหนดด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618..... 13 |
| 3.1 | แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย 21 |
| 3.2 | แสดงสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย 22 |
| 4.1 | แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุดิบด้วยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์..... 34 |
| 4.2 | แสดงผลการคำนวณอัตราส่วน Si/Al..... 43 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|---|
| 2.1 | แสดงโครงสร้างการเชื่อมพันธะของโพลีไซอะเลด..... 6 |
| 2.2 | แสดงแบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน 7 |
| 2.3 | แสดงรูปร่างของถ้ำลอยซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 14 |
| 3.1 | แสดงขั้นตอนและวิธีการทดลองของงานวิจัย..... 23 |
| 3.2 | แสดงเครื่อง X-ray fluorescence (XRF) 24 |
| 3.3 | แสดงเครื่อง X-ray diffractometer (XRD) 25 |
| 3.4 | แสดงเครื่อง Ion sputtering device 26 |
| 3.5 | แสดงเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) 27 |
| 3.6 | แสดงแสดงเครื่อง Gilmore needle 29 |
| 3.7 | แสดงเครื่องมือ Uniaxial press..... 30 |
| 3.8 | แสดงวิธีการวัดอุณหภูมิ 32 |
| 4.1 | แสดงรูปร่างของถ้ำลอยซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราดกำลังขยาย 1000 เท่า..... 35 |
| 4.2 | ผลวิเคราะห์ทางเฟสของถ้ำลอย..... 36 |
| 4.3 | แสดงผลวิเคราะห์ทางเฟสของแคลไซต์เกลิติน..... 37 |
| 4.4 | แสดงความเข้มข้นของไซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์..... 38 |
| 4.5 | แสดงความเข้มข้นของไซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์..... 39 |
| 4.6 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลายไซเดียมซลิเกตต่อสารละลาย ไซเดียมไฮดรอกไซด์กับกำลังรับแรงอัด..... 40 |
| 4.7 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลายไซเดียมซลิเกตต่อสารละลาย ไซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์..... 41 |
| 4.8 | ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ถ้ำลอยด้วย แคลไซต์เกลิตินในปริมาณต่างๆ..... 43 |

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

| | | |
|------|--|----|
| 4.9 | แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วย แคลไซน์เกาลินในปริมาณต่างๆ..... | 44 |
| 4.10 | แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่แคลไซน์เกาลินละลาย จีโอพอลิเมอร์ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์..... | 46 |
| 4.11 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อเวลาในการก่อตัวตามปริมาณ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับแคลไซน์เกาลอนละลายจีโอพอลิเมอร์..... | 46 |
| 4.12 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อแคลไซน์เกาลินละลาย กับเวลาในการก่อตัวจีโอพอลิเมอร์..... | 47 |
| 4.13 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับความหนาแน่น ของแคลไซน์เกาลอนละลายจีโอพอลิเมอร์..... | 48 |
| 4.14 | แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยผสมกับ แคลไซน์เกาลิน บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน กำลังขยาย 3000 เท่า..... | 49 |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาความสำคัญของปัญหา

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement, OPC) เป็นวัสดุที่ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ผลิตโดยการเผาแคลไซน์ (Calcined) สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ที่อุณหภูมิประมาณ 1450 องศาเซลเซียส (K. Svinning, 2006) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวต้องใช้เชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก อีกทั้งยังก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในปริมาณมหาศาล ซึ่งก๊าซดังกล่าวเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน จากผลกระทบดังกล่าวส่งผลให้นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุชนิดหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจมากในปัจจุบันคือ “จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)”

วัสดุจีโอพอลิเมอร์ สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเข้มข้นของอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) และ/หรือ อัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkaline silicate) กับสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) (P. Duxson et.al.,2007) จีโอพอลิเมอร์มีสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่าและมีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่น้อยมาก (J. L. Provis et.al.,2009) นอกจากนี้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังทนต่อความเป็นกรดได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (J. Davidovits,1987) และมีสมบัติในการยับยั้งการเคลื่อนที่ของอิออนโลหะหนัก (J.S.G. van Jaarsveld et.al.,1995) ทำให้จีโอพอลิเมอร์ถูกนำไปใช้งานในการเก็บกักโลหะเป็นพิษ (J.Davidovits,1994) นอกจากนี้ P.G. Malone (1986) ได้รายงานว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้มีความแข็งแรงที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์และยังมีการหดตัวภายหลังจากการแข็งตัวน้อยกว่า (P.G. Malone,1986)

โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ ประกอบด้วยโครงข่ายของซิลิกอน (Silicon) ออกซิเจน (Oxygen) และ อะลูมิเนียม (Aluminium) มีลักษณะคล้ายคลึงกับโครงสร้างของซีโอไลต์ (Zeolite) ที่อะตอมของซิลิกอนและอะลูมิเนียมเชื่อมต่อกันโดยการใช้อะตอมของออกซิเจนร่วมกัน (J. Davidovits,1994) ความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์เกิดจากการเชื่อมต่อระหว่างส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline) กับ ส่วนอสัณฐาน (Amorphous) (P.G. Malone, 1986) ภายใน โครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ ลักษณะโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์ถูกจำแนกตามสัดส่วนระหว่าง

ซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม ได้แก่ ซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมเท่ากับ 1, 2, 3 และมากกว่า 3 เรียกว่า โพลี ซิอาเต (Poly-sialate), โพลี ซิอาเต ซิลอกโซ (Poly-sialate-siloxo), โพลีซิอาเตไดซิลอกโซ (Poly-sialate-disiloxo) และซิอาเตลิงค์ (Sialate link) ตามลำดับ (J. Davidovits, 1994)

วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากการผสมสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา (Reactive solution) และ ผงจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer powder) เข้าด้วยกัน โดยผงจีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์เป็นองค์ประกอบ ที่ผ่านมาวัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้สังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์มี 3 ชนิด ได้แก่ ตะกรันเหล็ก (Arc furnace slag) ซึ่งเป็นวัสดุไม่มีพิษสามารถสังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สามารถใช้ในงานทนไฟ (T.W. Cheng et.al.,2003) วัตถุดิบชนิดที่สองคือ แคลไซน์กาลิน (Calcined Kaolin) เป็นวัตถุดิบที่อยู่ในรูปอสัญฐานได้จากการเผาเกาลินไนต์ (Kaolinite clay) เพื่อไล่น้ำในโครงสร้างของดินออกที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส (K. Ganesan et.al.,2007) แคลไซน์กาลินมีผลในการช่วยลดเวลาในการแข็งตัวและช่วยเพิ่มความทนแรงอัด (Compressive strength) ให้กับจีโอพอลิเมอร์ (M.D. Safiuddin et.al.,2010), (S. Abhilash et.al.,2011) และวัสดุชนิดสุดท้ายคือ เถ้าลอย เป็นผลผลิตพลอยได้ (By-product) จากโรงไฟฟ้าถ่านหินมีซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้จำแนกประเภทของเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ เถ้าลอยชั้นคุณภาพเอฟ (Class F) และชั้นคุณภาพซี (Class C) โดยชั้นคุณภาพเอฟเป็นเถ้าลอยที่มีปริมาณของซิลิกอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 โดยน้ำหนัก และชั้นคุณภาพซี มีปริมาณของ ซิลิกอน ไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และเหล็กออกไซด์รวมกันอยู่ระหว่างร้อยละ 50-70 โดยน้ำหนัก เถ้าลอยเป็นวัสดุที่มีศักยภาพสูงในการนำมาพัฒนาเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์

ปัจจุบันมีเถ้าลอยเหลือทิ้งจากโรงไฟฟ้าถ่านหินเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ปัญหาของเสียจากอุตสาหกรรมผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหินอย่างยั่งยืน งานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อมุ่งเน้นพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยและแคลไซน์กาลินเป็นวัตถุดิบหลัก

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เถ้าลอยเป็นสารตั้งต้นและปรับปรุงสมบัติด้วยแคลไซน์กาลินร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

1.2.2 เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำปฏิกิริยากับผงจีโอพอลิเมอร์

1.2.3 เพื่อหาอัตราส่วนของสารละลาย $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการทำปฏิกิริยากับผงจีโอพอลิเมอร์

1.2.4 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ผงจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและแคลไซต์เกาหลี

1.2.5 เพื่อหาปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เหมาะสมต่อการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอย และแคลไซต์เกาหลีด้วยเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-Ray Fluorescence, XRF) เอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-Ray Diffraction, XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM)

1.3.2 สังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์ โดยใช้เถ้าลอย และแคลไซต์เกาหลี เป็นสารตั้งต้น

1.3.3 ตรวจสอบลักษณะของสารละลายที่เหมาะสมสำหรับทำปฏิกิริยากับผงจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และสัดส่วนในการผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

1.3.4 ตรวจสอบส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยและแคลไซต์เกาหลี

1.3.5 ตรวจสอบผลของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต่อความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ การเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ลงในจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย และแคลไซต์เกาหลี

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้วัสดุทดแทนปูนซีเมนต์ที่มีราคาถูกและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมซึ่งผลิตจากของเสียในอุตสาหกรรมผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยถ่านหิน

1.4.2 งานวิจัยนี้เป็นการสร้างฐานงานวิจัยชิ้นใหม่ภายในประเทศ ผ่านขบวนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อเป็นองค์ความรู้ในการใช้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอย่างจำกัดให้คุ้มค่าและได้ประโยชน์มากที่สุด รวมถึงสามารถใช้งานวิจัยนี้เป็นต้นแบบในการนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

1.4.3 งานวิจัยชิ้นนี้เป็นการส่งเสริมและให้ความรู้เกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ให้แก่วิศวกรผู้รับเหมาก่อสร้างตลอดจนบริษัทต่างๆ ผ่านรายงานการวิจัยหรือบทความของงานวิจัย

บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 จีโอพอลิเมอร์

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Ordinary Portland Cement, OPC) เป็นวัสดุที่ถูกใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้าง ผลิตโดยการเผาแคลไซน์ (Calcined) สารประกอบแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ซิลิกา (SiO₂) และอะลูมินา (Al₂O₃) ที่อุณหภูมิประมาณ 1450 องศาเซลเซียส (K. Svinning, 2006) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวต้องใช้เชื้อเพลิงและพลังงานสูงมาก อีกทั้งยังก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในปริมาณมหาศาล ก๊าซดังกล่าวเป็นหนึ่งในสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดสภาวะโลกร้อน จากผลกระทบดังกล่าวส่งผลให้นักวิจัยหลายกลุ่มพยายามพัฒนาวัสดุชนิดใหม่ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ วัสดุชนิดหนึ่งที่ได้รับคามสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบันคือ “จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer)”

จีโอพอลิเมอร์ (Geopolymer) เป็นวัสดุเชื่อมประสานชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างสามมิติโดยจะอยู่ในรูปของอสัณฐาน (Amorphous) มีสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) เป็นองค์ประกอบหลัก (ซิลิกา และ อะลูมินา) โดยสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตจะถูกทำให้แตกตัวด้วยสารละลายอัลคาไลน์หรือสารละลายที่เป็นด่างสูงได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na₂SiO₃) หรือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โดยให้ความร้อนเป็นตัวช่วยเร่งปฏิกิริยาทำให้เกิดการก่อตัวและแข็งตัวสามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ หลังจากการเกิดปฏิกิริยาแล้วจะได้วัสดุเชื่อมประสานชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ได้ (J. L. Provis and J. S. J. van Deventer, 2009) เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีศักยภาพและมีสมบัติเหมาะสมต่อการใช้งานจีโอพอลิเมอร์ถูกค้นพบโดย Dr. Glukhovskiy ชาวสหภาพโซเวียต ในปี ค.ศ. 1950 จากนั้นในปี 1972 J. Davidovits นักวิทยาศาสตร์เคมีชาวฝรั่งเศส ได้ตั้งชื่อวัสดุชนิดนี้ว่า “จีโอพอลิเมอร์”

2.1.1 สมบัติทั่วไปของจีโอพอลิเมอร์

วัสดุจีโอพอลิเมอร์สามารถสังเคราะห์ได้จากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายเข้มข้นของอัลคาไลไฮดรอกไซด์ (Alkali hydroxide) และ/หรือ อัลคาไลน์ซิลิเกต (Alkaline silicate) กับสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) (P. Duxson et.al., 2007) จีโอพอลิเมอร์มีสมบัติคล้ายปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ แต่ใช้พลังงานในการผลิตน้อยกว่าและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

น้อยมาก (J. L. Provis et.al.,2009) นอกจากนี้ วัสดุจีโอพอลิเมอร์ยังทนต่อความเป็นกรด (Acid resistance) ได้ดีกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (J. Davidovits,1987) และมีสมบัติในการยับยั้งการเคลื่อนที่ของไอออนโลหะหนัก (J.S.G. van Jaarsveld et.al.,1995) ทำให้จีโอพอลิเมอร์ถูกนำไปใช้งานในการเก็บกักโลหะเป็นพิษ (J.Davidovits,1994) จีโอพอลิเมอร์ยังมีสมบัติที่โดดเด่นหลายประการเหมาะต่อการนำไปใช้งานทางวิศวกรรมได้หลากหลายเช่น มีความทนทานต่อสถานะซัลเฟต (Sulfate resistance) มีความทนทานต่อสถานะเยือกแข็ง (Freeze-thaw resistance) ทนทานต่อการกัดกร่อน (Corrosion resistance) มีความทนไฟ (Fire resistance) นอกจากนี้ P.G. Malone (1986) ได้รายงานว่ววัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ มีความแข็งแรงที่สูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ และยังมีการหดตัวภายหลังจากการแข็งตัวน้อยกว่า (P.G. Malone,1986)

จีโอพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถสังเคราะห์ได้จากวัตถุดิบที่เป็นของเสียเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและวัตถุดิบตามธรรมชาติที่หาได้ง่ายซึ่งที่ผ่านมามีวัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้สังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์มี 3 ชนิด ได้แก่ ตะกรันเหล็ก (Arc furnace slag) เป็นวัสดุไม่มีพิษสามารถสังเคราะห์เป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สามารถใช้ในงานทนไฟ (T.W. Cheng et.al.,2003) วัตถุดิบชนิดที่สองคือแคลไซน์เกาลิน (Calcined Kaolin) เป็นวัตถุดิบที่อยู่ในรูปอสัณฐานได้จากการเผาเกาลินไนต์ (Kaolinite clay) เพื่อไล่น้ำในโครงสร้างของดินออกที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส (K. Ganesan et.al., 2007) แคลไซน์เกาลินมีผลในการช่วยลดเวลาในการแข็งตัวและช่วยเพิ่มกำลังรับแรงอัด (Compressive strength) ให้กับจีโอพอลิเมอร์ (M.D. Safiuddin et.al., 2010), (S. Abhilash et.al., 2011) และ วัสดุชนิดสุดท้ายคือ ถ้ำลอย เป็นผลผลิตพลอยได้ (By-product) จากโรงไฟฟ้าถ่านหินมีซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญ

2.1.2 การทำปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์

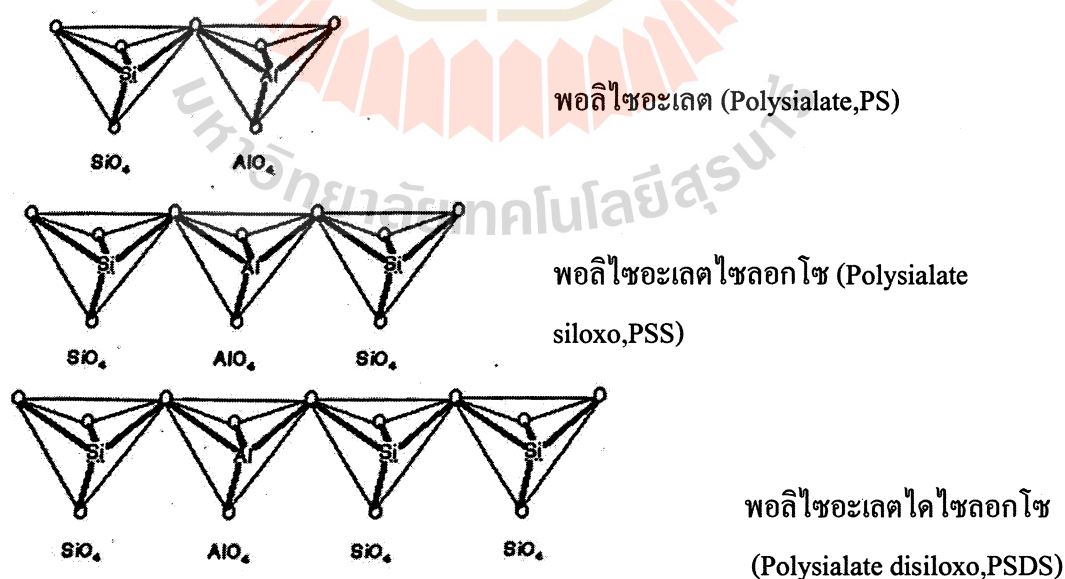
จีโอพอลิเมอร์เกิดจากการทำปฏิกิริยาสารละลายอัลคาไลที่มีความเข้มข้นสูงกับออกไซด์ของซิลิกอนและอะลูมิเนียม สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ทั้งอุณหภูมิห้องและอุณหภูมิสูงสามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ กระบวนการเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

2.1.2.1 กระบวนการชะละลาย (Dissolution)

เมื่อวัตถุดิบตั้งต้นที่เป็นสารประกอบออลูมิโนซิลิเกตถูกผสมเข้ากับสารละลายด่างความเข้มข้นสูง สารประกอบดังกล่าวจะถูกชะละลาย แยกตัวเป็นออลูมิเนียม (Al) และซิลิกอน (Si) ที่เป็นสารหลักออกมาจากวัตถุดิบตั้งต้นเมื่อเกิดการชะละลายวัตถุดิบมากขึ้น พื้นผิวของวัตถุดิบจะเกิดเป็นหลุมช่องว่างจำนวนมากทำให้สารละลายสามารถเข้าไปทำการชะละลายให้แตกตัวออกมาได้อย่างง่ายยิ่งขึ้น (A. Frenandez et.al., 2004)

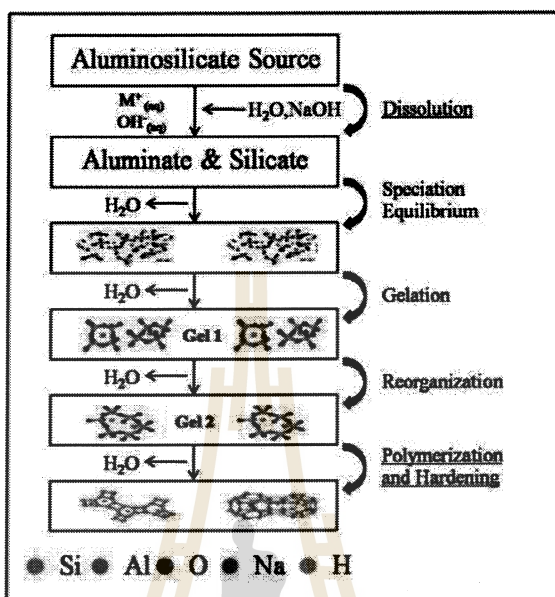
2.1.2.2 ปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) และการแข็งตัว (Hardness)

จากปฏิกิริยาเบื้องต้นจะได้ผลผลิตเป็นหน่วยพริสมิตสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านของ Si^{4+} และ Al^{3+} ที่เกิดการโคออร์ดิเนตกันแบบ 4 แขนกับออกซิเจน (O) หน่วยเหล่านี้จะกระจัดกระจายอยู่ในรูปแบบ พอลิเมอร์ที่มีการเชื่อมต่อกันจะได้หน่วยกึ่งเสถียร (meta-stable) ในช่วงเริ่มแรกจะมี Al ปริมาณมากและเมื่อเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นหน่วยดังกล่าวจะเปลี่ยนไปเป็นหน่วยที่มี Si ปริมาณมาก โครงสร้างหลักๆจึงประกอบไปด้วย พริสมิตสามเหลี่ยมด้านเท่าสี่ด้านสอง สาม และสี่หน่วยได้แก่พอลิไซอะเลต (Polysialate), พอลิไซอะเลตไซลอกโซ (Polysialate siloxo), พอลิไซอะเลตไดไซลอกโซ (Polysialate disiloxo) ดังแสดงในภาพที่ 2.1 กลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอไรเซชันแสดงในภาพที่ 2.2 (P. Duxson, et al., 2007) พงจีโอพอลิเมอร์ถูกผสมเข้ากับสารละลายอัลคาไลโดยอัลคาไลไฮดรอกไซด์และไฮดรอกไซด์ไอออนจะเป็นตัวเข้าไปสลายพันธะของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกต อะลูมิเนียมและซิลิเกตที่ถูกสลายพันธะจะเกิดการแตกตัวและเกิดสมดุลงขึ้นใหม่ และจัดเรียงตัวก่อตัวเป็นเจลของโครงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกตจากนั้นจะขึ้นรูปเป็นโครงสร้างแบบสายโซ่และแข็งตัว โดยมีขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาดังนี้ (1) อัลคาไลจะเข้าสลายพันธะโครงสร้างของสารประกอบอะลูมิเนียมซิลิเกตเกิดการแตกตัวในขั้นตอนนี้ (2) เริ่มเกิดการสร้างสมดุลงและจัดเรียงโครงสร้างขึ้นใหม่ (3) เกิดการควบแน่นและจัดเรียงโครงสร้างตัวเป็นเจลของโครงข่ายอะลูมิเนียมซิลิเกต (4) เกิดการจัดเรียงตัวเป็นโครงข่ายขนาดใหญ่ (5) เกิดการควบแน่นแบบโพลีคอนเดนเซชันและแข็งตัว



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างการเชื่อมพันธะของพอลิไซอะเลตที่มี Si:Al =1 (PS), Si:Al =2 (PSS) และ Si:Al=3 (PSDS) ตามลำดับ (Davidovits, 1988b)

จากการทำปฏิกิริยาลูกโซ่โมเลกุลจะมีการเชื่อมขวางและต่อกันมากขึ้น ในลักษณะของเส้นโพลิเมอร์ (Polymer Chain) ส่งผลให้โครงสร้างเกิดความสามารถรับกำลังแรงอัดได้



ภาพที่ 2.2 แบบจำลองกลไกการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์เรซิน

(Jimenez, et al., 2004 และ Hench, 1998)

2.1.3 ความแตกต่างระหว่างจีโอพอลิเมอร์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ลักษณะโครงสร้างของจีโอพอลิเมอร์มีความแตกต่างจากลักษณะโครงสร้างของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตรงที่องค์ประกอบหลักของวัสดุและการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เหมือนกัน การเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์นั้นจะไม่เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) เหมือนกับการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland cement hydration) ดังสมการที่ 2.1 และ 2.2 เนื่องจากวัตถุดิบตั้งต้นแตกต่างกัน จีโอพอลิเมอร์มีโครงสร้างหลักเป็นแบบสามมิติที่มีซิลิกอน (Si) อะลูมิเนียม (Al) และ ออกซิเจน (O) เป็นองค์ประกอบ โดย การเกิดปฏิกิริยาของจีโอพอลิเมอร์ (Geopolymerization) จะเกิดจากการสลายตัวของสารประกอบอะลูมิโนซิลิเกตภายใต้สภาวะความเป็นด่างสูงจึงเป็นการทำให้สารเหล่านี้แตกตัวออกมาทำปฏิกิริยาเคมีเกิดการจับตัวและจัดเรียงตัวกันใหม่ในลักษณะเป็นสายโซ่พอลิเมอร์ (Polymer Chain) ดังสมการที่ 2.3 โดยปกติแล้วการจะเกิดสายโซ่พอลิเมอร์ได้อย่างรวดเร็วจำเป็นต้องใช้ความร้อนเป็นตัวช่วยในการเร่งปฏิกิริยา

ออกไซด์ (Fe_2O_3) ออกไซด์ทั้ง 4 นี้รวมกันแล้วได้มากกว่าร้อยละ 90 ของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ส่วนที่เหลือเป็นออกไซด์รองและอื่นๆผสมอยู่ด้วย ได้แก่ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO), โซเดียมออกไซด์ (Na_2O), โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O), ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3), ไทเทเนียมออกไซด์ (TiO_2) และ ฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) เมื่อทำการเผาออกไซด์เหล่านี้แล้ว จะได้สารประกอบ 4 ชนิด ได้แก่ ไตรแคลเซียมซิลิเกต องค์กรประกอบทางเคมีคือ 3CaO , SiO_2 และย่อว่า C_3S , ไดแคลเซียมซิลิเกต องค์กรประกอบทางเคมีคือ 2CaO , SiO_2 และย่อว่า C_2S , ไตรแคลเซียมอลูมิเนต องค์กรประกอบทางเคมี คือ 3CaO , Al_2O_3 และย่อว่า C_3A , เตตระแคลเซียมอลูมิโนเฟอร์ไรต์ องค์กรประกอบทางเคมี 4CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 และ ย่อว่า C_4AF

ตารางที่ 2.1 องค์กรประกอบหลักและรองทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์
(ปริญญา จินดาประเสริฐ, 2549)

| องค์กรประกอบทางเคมี | องค์กรประกอบทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ | | |
|--|--|------------------|-----------|
| | สัญลักษณ์ | ร้อยละโดยน้ำหนัก | ค่าเฉลี่ย |
| CaO | C | 60-67 | 64.4 |
| SiO ₂ | S | 17-25 | 20.0 |
| Al ₂ O ₃ | A | 3-8 | 5.8 |
| Fe ₂ O ₃ | F | 0.5-6.0 | 3.2 |
| MgO | M | 0.1-4.0 | 0.5 |
| Na ₂ O | N | 0.1-1.8 | 0.5 |
| K ₂ O | K | 0.1-1.8 | 0.5 |
| SO ₃ | S ⁻ | 0.5-3.0 | 2.6 |
| สารประกอบอื่น ๆ | - | 1.0-3.0 | 1.0 |
| การสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา (loss on ignition) | LOI | 0.1-3.0 | 1.0 |
| กากที่ไม่ละลายในกรดและด่าง (insoluble residue) | - | 0.2-0.8 | 0.5 |

2.2.2 สมบัติของสารประกอบหลัก

ตัวกำหนดสมบัติของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ที่มีมากถึงร้อยละ 90 ได้แก่ C_3S , C_2S , C_3A และ C_4AF ซึ่งสมบัติสามารถสรุปได้ดังนี้คือ C_3S ที่มีอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ปริมาณมากที่สุดประมาณร้อยละ 45-55 จะให้สีเทาแก่สามารถสลายตัวได้ที่อุณหภูมิ $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งการสลายตัวจะเป็นไปอย่างค่อนข้างช้าและเมื่อลดอุณหภูมิลงอย่างรวดเร็วจนถึงประมาณ $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ องศาเซลเซียส จะเกิดความเสถียรไม่เปลี่ยนแปลงสภาพเมื่อผสมกับน้ำจะเกิดการก่อตัวให้กำลังรับแรงอัดค่อนข้างดีโดยเฉพาะในช่วง 7 วันแรก ในขณะที่เกิดการก่อตัวนั้นเป็นปฏิกิริยาระหว่าง C_3S กับน้ำเรียกว่า ไฮเดรชัน (Hydration) จากปฏิกิริยาดังกล่าวจะทำให้เกิดการคายความร้อนขึ้นประมาณ 500 จูล/กรัม เรียกว่า ความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (Heat of hydration)

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มี C_2S อยู่โดยประมาณร้อยละ 15-35 โดยทั่วไป C_2S จะมีความบริสุทธิ์ 4 รูปแบบได้แก่ $\alpha\text{-}C_2S$ เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ $1,450\text{ }^{\circ}\text{C}$ เมื่ออุณหภูมิลดลงจะเปลี่ยนสภาพเป็น $\alpha'\text{-}C_2S$ และเมื่ออุณหภูมิลดลงจนถึงอุณหภูมิกัดจะเปลี่ยนสภาพเป็น $\beta\text{-}C_2S$ ปกติแล้ว C_2S ที่ปะปนอยู่ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะไม่มีความบริสุทธิ์เนื่องจากมีสารอื่นๆผสมอยู่ด้วยส่งผลให้ไม่เกิดการเปลี่ยนสภาพจาก $\beta\text{-}C_2S$ เป็น C_2S ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ $\beta\text{-}C_2S$ มีความเสถียรที่อุณหภูมิกัด กำลังรับแรงอัดที่ให้เป็นไปค่อนข้างช้ามาก คือหลังจากทำปฏิกิริยากับน้ำจะเริ่มให้กำลังรับแรงอัดหลังจาก 4 สัปดาห์ขึ้นไปและความร้อนจากปฏิกิริยาเมื่อผสมกับน้ำจะไม่สูงเทียบเท่า C_3S

ลักษณะรูปร่างของ C_3A มีรูปร่างเป็นเหลี่ยมมีสีเทาอ่อนกว่า C_3S ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีอยู่โดยประมาณร้อยละ 7-15 เมื่อผสมกับน้ำแล้วจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเกิดการก่อตัวขึ้นทันทีที่สามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ภายในหนึ่งวัน ความร้อนจากปฏิกิริยาเมื่อผสมกับน้ำจะสูงมากในขณะที่ C_4AF ในปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ จะมีอยู่โดยประมาณร้อยละ 5-10 เมื่อผสมกับน้ำแล้วจะทำปฏิกิริยาอย่างรวดเร็วเหมือนกับ C_3A แต่ความร้อนจากปฏิกิริยากับน้ำจะมีค่าปานกลางไม่สูงเทียบเท่า C_3A สามารถให้กำลังรับแรงอัดได้ภายในหนึ่งวันเช่นกัน

ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ สามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทใหญ่ๆให้เหมาะสมต่อการใช้งานประเภทต่างๆกำหนดให้มีมาตรฐาน ASTM C-150 และมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 1 ดังต่อไปนี้

2.2.2.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่หนึ่ง

เป็นปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ธรรมดา (Ordinary Portland Cement) คุณภาพของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C-150 TYPE 1 และมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มอก.15 เล่ม 1-2555 ประเภทหนึ่ง ให้ความร้อนและกำลังรับแรงอัดปานกลางใช้ในงานคอนกรีตทั่วไปเช่นงานคอนกรีตเสริมแรงด้วยเหล็ก งานก่อสร้างสะพาน ถนนหรือผลิตภัณฑ์ อุตสาหกรรมที่รับแรงอัดประเภทต่างๆ

2.2.2.2 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่สอง

เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ดัดแปลง (Modified Portland Cement) ให้ความร้อนต่ำกว่าแต่ให้กำลังแรงอัดใกล้เคียงกับปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทหนึ่งใช้สำหรับงานโครงสร้างที่ต้องการความทนทานต่อการแทรกซึมของซัลเฟตจากสภาพแวดล้อมระดับปานกลาง เช่น น้ำเสียจากบ้านเรือนและโรงงานอุตสาหกรรม น้ำในดินและน้ำใต้ดิน งานหล่อท่อคอนกรีตขนาดใหญ่ ตอม่อสะพาน เป็นต้น

2.2.2.3 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่สาม

เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ก่อตัวเร็ว (High Early Strength Portland Cement) คุณภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C-150 TYPE 3 และในมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 1-2555 ให้กำลังอัดเร็วในระยะแรก ลักษณะเป็นผงละเอียดขนาดเล็กลงและมีปริมาณ C_3S มากกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ธรรมดาทำให้เกิดความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยาและให้ความร้อนสูง เหมาะกับการนำไปใช้กับงานคอนกรีตที่ต้องการรับน้ำหนักและถอดแบบเร่งด่วน เช่น เสาเข็มคอนกรีต แผ่นพื้น คาน และเสาไฟฟ้า เป็นต้น

2.2.2.4 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทประเภทที่สี่

เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทเกิดความร้อนต่ำ (Low Heat Portland Cement) คุณภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C595 เหมาะสำหรับงานคอนกรีตที่มีปริมาณเทครั้งละมากๆ ขณะก่อตัวให้ความร้อนต่ำ เนื่องจากมี C_3S น้อยกว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ธรรมดา ใช้ในการก่อสร้างเขื่อนซึ่งการขึ้นโครงสร้างจำเป็นต้องใช้คอนกรีตจำนวนมากในการก่อสร้างแต่ละครั้งและเกิดคายความร้อนสะสมภายในสูงทำให้คอนกรีตภายในเกิดการขยายตัวและเกิดการแตกร้าวตามมา การใช้ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทนี้จะช่วยควบคุมความร้อนขณะเกิดการก่อตัวให้เป็นไปอย่างช้าๆ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตประเภทนี้จะค่อยๆ เพิ่มขึ้น ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทนี้ยัง ไม่มีการผลิตและจำหน่ายภายในประเทศ

2.2.2.5 ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ประเภทที่ห้า

เป็นปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ทนซัลเฟตได้สูง (Sulfate-Resistant Portland Cement) คุณภาพของปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มีสมบัติตามมาตรฐาน ASTM C-150 TYPE 5 และมาตรฐานอุตสาหกรรมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ มอก. 15 เล่ม 1-2555 ประเภทห้า มีระยะเวลาการก่อตัวและแข็งตัวช้ากว่าปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ประเภทหนึ่ง มี C_3A น้อยมาก ใช้สำหรับงานโครงสร้างที่อยู่บริเวณน้ำเค็ม หรือโครงสร้างที่อยู่ในบริเวณที่มีดินเค็ม เช่น งานโครงสร้างท่าเทียบเรือ สะพานปลา อาคาร และสิ่งปลูกสร้างต่างๆริมทะเล เป็นต้น

2.3 เถ้าลอย

เถ้าลอย หรือ เถ้าถ่านหิน (Fly ash หรือ Pulverized fuel ash) เริ่มถูกนำมาใช้ในราวปี ค.ศ. 1930 เป็นเถ้าถ่านหินขนาดเล็กมีขนาดตั้งแต่ 1 ไมโครเมตรไปจนถึงประมาณ 200 ไมโครเมตร สาเหตุที่เรียกว่าเถ้าลอยเนื่องจากเป็นขี้เถ้าที่หลงเหลือจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินหรือลิกไนต์ โดยจะปลิวปะปนไปกับก๊าซร้อนและออกสู่ชั้นบรรยากาศภายนอกทางด้านปล่องควันของโรงงานผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหินจึงเรียกว่าเถ้าลอย ซึ่งหากมีปริมาณเถ้าปลิวปะปนในชั้นบรรยากาศเป็นจำนวนมากอาจส่งผลกระทบต่อให้เกิดปัญหาหมอกควันทางอากาศได้ ดังนั้นโรงงานผลิตไฟฟ้าด้วยถ่านหินจึงมีการติดตั้งเครื่องดักจับฝุ่นแบบไฟฟ้าสถิต โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อคัดแยกก๊าซร้อนและเถ้าลอยให้ออกจากกันก่อนปล่อยก๊าซร้อนออกสู่บรรยากาศ เถ้าลอยโดยทั่วไปจะมีสีเทา เทาดำหรือน้ำตาล เถ้าลอยมีซิลิกาและอลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก เมื่อเถ้าลอยอยู่ในสภาพที่แห้งหรือเป็นผงฝุ่น จะไม่มีสมบัติในการเชื่อมเกาะหรือยึดเกาะกันระหว่างอนุภาค และเมื่อเถ้าลอยสัมผัสเข้ากับน้ำภายใต้อุณหภูมิปกติจะสามารถทำปฏิกิริยากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) เกิดเป็นสารใหม่มีสมบัติในการเชื่อมประสาน (Cementitious) ความสามารถในการเชื่อมประสานและลักษณะต่างๆ ของเถ้าลอยนั้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของถ่านหินและปัจจัยอื่นๆ เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ช่วงระยะเวลาในการเผา ดังนั้นคุณภาพและลักษณะรูปร่างต่างๆ รวมถึงความสม่ำเสมอของเถ้าลอยจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่เผาถ่านหินด้วยเช่นกัน

2.3.1 สมบัติพื้นฐานของเถ้าลอย

ตามมาตรฐาน ASTM C618 ได้จำแนกประเภทของเถ้าลอยออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

2.3.1.1 ประเภทชั้นคุณภาพเอฟ (Class F) คือเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหิน ชนิดแอนทราไซต์และชนิดบิทูมินัส โดยมีปริมาณของ SiO_2 , Al_2O_3 และ Fe_2O_3 รวมกันมากกว่าร้อยละ 70 โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยในชั้นคุณภาพเอฟ จะมีปริมาณ CaO ในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงเรียกกันทั่วไปว่าเถ้าลอยแคลเซียมต่ำ ในขณะที่ซิลิกาปริมาณสูงนั้นได้มาจากดินเหนียวและควอร์ตซ์ที่มีอยู่ในถ่านหินชนิดแอนทราไซต์ และชนิด บิทูมินัสจึงส่งผลให้เถ้าลอยชั้นคุณภาพเอฟมีซิลิกาสูง (R. Siddique, 2003)

2.3.1.2 ประเภทชั้นคุณภาพซี คือเถ้าลอยที่ได้จากการเผาถ่านหิน ชนิดลิกไนต์และซับบิทูมินัส เป็นส่วนใหญ่ โดยมีปริมาณของแคลเซียมออกไซด์ (CaO), ซิลิกา (SiO_2), อลูมินา (Al_2O_3) และเหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) โดยออกไซด์รวมกันมากกว่าร้อยละ 50 มีสมบัติอื่นตามมาตรฐาน ASTM C618 เถ้าลอยประเภทนี้มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) ในปริมาณสูงจึงเรียกเถ้าลอยชนิดนี้ว่าเถ้าลอยคุณภาพสูง

ตารางที่ 2.2 ข้อกำหนดด้านเคมีของเถ้าลอยตามมาตรฐาน ASTM C618

| องค์ประกอบทางเคมี | ชั้นคุณภาพเถ้าลอย | |
|--|-------------------|--------------|
| | ชั้นคุณภาพเอฟ | ชั้นคุณภาพซี |
| ผลรวมของปริมาณซิลิกา อะลูมินา และเฟอร์ริก ออกไซด์ (SiO ₃ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃) Min% | 70.0 | 50.0 |
| ชั้นเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) Max% | 5.0 | 5.0 |
| ปริมาณความชื้นไม่เกิน Max% | 3.0 | 3.0 |
| น้ำหนักที่สูญหายเนื่องจากการเผา (Loss on ignition; LOI) Max% | 6.0 | 6.0 |
| อัลคาไลน์ในรูปของ โซเดียมไดออกไซด์ (Na ₂ O) Max% | 1.5 | 1.5 |

2.3.2 สมบัติทางกายภาพของเถ้าลอย

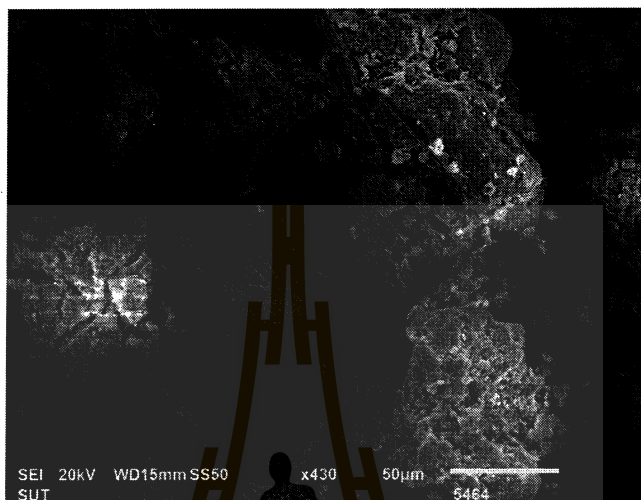
สมบัติทางกายภาพ โดยทั่วไปของเถ้าลอยอาจมีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น กระบวนการเผาไหม้ หากมีการเผาด่านหินร่วมกับน้ำมันเตามักจะมีการเติมวัสดุบางอย่างเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ และลดการกัดกร่อน ดังนั้นการทดสอบสมบัติต่างๆของเถ้าลอยก่อนนำไปใช้งานจึงมีความจำเป็น โดยมาตรฐานที่ใช้ควบคุมสมบัติทางกายภาพของเถ้าลอยได้แก่มาตรฐาน ASTM C618

2.3.3 ลักษณะรูปร่างเถ้าลอย

โดยทั่วไปแล้วเถ้าลอยส่วนใหญ่จะมีลักษณะรูปร่างค่อนข้างกลมหรือเกือบกลมในบางครั้งอาจพบเห็นเถ้าลอยลักษณะมีรูพรุนหรือพบเป็นลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนผิวขรุขระเนื่องจากการเผาในระบบฟลูอิด ไคซ์เบดทำให้อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไม่สูงมากพอที่จะทำให้เกิดการหลอมตัวของซิลิกาส่งผลให้มีเพียงบางส่วนเท่านั้นที่เกิดการหลอมละลาย ดังนั้นจึงทำให้มีลักษณะรูปร่างที่ไม่แน่นอนดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยจะมีความแตกต่างจากปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์อย่างสิ้นเชิง โดยลักษณะของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นั้นเป็นแท่งเข็มหรือเป็นเหลี่ยมสานตัวกันเกิดความแข็งแรงภายในสามารถรับกำลังแรงอัดได้

เมื่อทำการถ่ายภาพอนุภาคเถ้าลอยจากถ่านหินลิกไนต์ที่ทำการเผาโดยบริษัท คีบีแอล เอ (1991) จำกัด (มหาชน) จังหวัดปราจีนบุรี ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) พบรูปร่างเถ้าลอยทั้งที่เป็นทรงกลมและรูปร่างที่ไม่แน่นอนขนาดคละกัน ดังภาพที่ 2.3 ภายในเถ้าลอยยังประกอบด้วยอนุภาคที่เป็นโพรงเรียกว่าซีโนสเฟีย (Cenosphere) เกิดจากก๊าซในขณะที่กำลังเผาไหม้ (CS. Poon et al., 2003., PK. Kolay et al., 2001) อีกทั้งยังมีเถ้าลอยที่มีความกลวงด้านในและมีอนุภาคของเถ้าลอยขนาดเล็กๆแทรกอยู่ภายในเรียกว่า

พลีโรสเฟีย (Plerosphere) (SV.Vassilev et al., 2003.) การเผาเถ้าลอยที่อุณหภูมิสูงจึงทำให้เถ้าลอยนั้นมีส่วนประกอบหลักเป็นแก้ว (Aluminosilicate glass) และเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้เถ้าลอยมีสมบัติทนความร้อนได้ดีและมีน้ำหนักเบา



ภาพที่ 2.3 รูปร่างของเถ้าลอยซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

2.3.4 ขนาดและความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอย

อนุภาคของเถ้าลอยมีขนาดตั้งแต่เล็กกว่า 1 ไมครอน ไปจนถึง 200 ไมครอน โดยคิดเฉลี่ยแล้วเถ้าลอยจะมีขนาดอยู่ที่ประมาณ 15-30 ไมครอน ความถ่วงจำเพาะ (ถ.พ.) ใช้วิธีทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ตามมาตรฐาน ASTM C118 (L. Jiang, et al., 2001) มีความถ่วงจำเพาะประมาณ 1.9-2.9 (Siddique, 2003, N. Bouzoubaa et.al., 2003, P. Chindapasirt et.al., 2004) ซึ่งจะพบว่าต่ำกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ความถ่วงจำเพาะของเถ้าลอยที่สูงนั้นส่วนใหญ่เป็นผลมาจากปริมาณร้อยละของ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) หรือ เหล็กออกไซด์ (Fe₂O₃) ที่ผสมอยู่ในปริมาณมากนอกเหนือจากนั้นยังพบว่าความถ่วงจำเพาะจากการเผาเถ้าลอยในรอบเดียวกันหากอนุภาคของเถ้าลอยมีความละเอียดจะส่งผลให้มีความถ่วงจำเพาะที่สูงกว่าอนุภาคเถ้าลอยที่มีความหยาบ

2.3.5 ดัชนีการพัฒนากำลังของเถ้าลอย

ดัชนีการพัฒนากำลัง (Strength Activity Index) เป็นการวัดความเป็นปอซโซลานของเถ้าลอยสามารถทำการวัดได้หลายวิธี การหาค่าดัชนีการพัฒนากำลังใช้การวัดตามมาตรฐาน ASTM C618 เป็นการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 7 หรือ 28 วัน ใช้วิธีทดสอบตามมาตรฐาน C311 โดยใช้มอร์ต้าร์ตามมาตรฐาน ASTM C109 มอร์ต้าร์ที่ทำการทดสอบใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

ปริมาณ 400 กรัม etailoy 100 กรัม ทราหมาตรฐาน (Graded standard sand) 1,375 กรัม และผสมน้ำ ที่ให้ค่าการไหลผ่าน ± 5 ของการไหลแผ่ของมอร์ต้าร์ควบคุมตามมาตรฐาน ASTM C618 ทำการ ควบคุมส่วนผสมอย่างต่ำร้อยละ 75 ของมอร์ต้าร์มาตรฐาน ที่อายุ 7 หรือ 28 วัน

2.3.6 ความต้องการน้ำของetailoy

ในเรื่องความต้องการน้ำของetailoyถูกระบุตามมาตรฐาน ASTM C618 โดย มาตรฐาน ASTM C311 ระบุให้ใช้ส่วนผสมเดียวกันกับการทดสอบหาคะขี้การพัฒนากำลังetailoy ที่มีอนุภาคเป็นทรงกลมจะช่วยให้ส่วนผสมมีความลื่นไหลได้ดีจึงส่งผลทำส่วนผสมนั้นมีความ ต้องการน้ำต่ำ การที่ส่วนผสมมีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นนั้นหมายถึงetailoyมีรูปร่างที่ไม่เป็นทรง กลม หรือ มีผิวที่ขรุขระและมีรูพรุนมากจึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งาน

2.3.7 ความสม่ำเสมอของetailoy

ความสม่ำเสมอของetailoy ได้มีการกำหนดให้ตรวจสอบสองส่วนได้แก่ปริมาณ ร้อยละที่ค้ำตะแครงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C311 และความหนาแน่น (Density) ตาม มาตรฐาน ASTM C118 โดยกำหนดให้ใช้etailoy 50 กรัม แทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 64 กรัม ระบุค่าเฉลี่ยของความหนาแน่นไม่เกินร้อยละ 5 และความหนาแน่นของตัวอย่างแต่ละตัวอย่าง จะต้องไม่แตกต่างจากค่าเฉลี่ยสิบตัวอย่างที่ทำการทดสอบก่อนหน้า หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อน หน้าทั้งหมดหากทำการทดสอบจำนวนไม่ถึงสิบตัวอย่าง

การทดสอบปริมาณร้อยละของetailoyที่ค้ำตะแครงเบอร์ 325 ตามมาตรฐาน ASTM C430 โดยระบุให้ปริมาณร้อยละของetailoyที่ค้ำตะแครงเบอร์ 325 ต่างจากค่าเฉลี่ยไม่เกิน ร้อยละ 5 ตามมาตรฐาน ASTM C618 ความหนาแน่นของตัวอย่างแต่ละตัวอย่างจะต้องไม่แตกต่าง จากค่าเฉลี่ยสิบตัวอย่างที่ทำการทดสอบก่อนหน้า หรือค่าเฉลี่ยของตัวอย่างก่อนหน้าทั้งหมดหากทำ การทดสอบจำนวนไม่ถึงสิบตัวอย่าง

2.3.8 แฟคเตอร์ผลคูณ (Multiple factor)

แฟคเตอร์ผลคูณคือค่าแสดงความระเอียดของetailoyค่าหนึ่ง ซึ่งหาได้จากผลคูณ ระหว่างปริมาณกากค้ำตะแครงเบอร์ 325 กับค่าน้ำหนักที่หายไปหลังการเผา ซึ่งตามมาตรฐาน ASTM C618 กำหนดให้แฟคเตอร์ผลคูณต้องไม่เกิน 255 ทั้งนี้ค่าดังกล่าวใช้ได้กับetailoyชั้น คุณภาพเอฟเท่านั้น

2.4 ดินขาว

ดินขาว (Kaolinite) เป็นดินชนิดปฐมภูมิ (Primary Clay) ได้จากกระบวนการทำเหมืองแบบเปิด (Open-cast Pits) โดยใช้ น้ำแรงดันสูงในการฉีดชะล้างดิน จากนั้นน้ำจะพัดพาเอาดินและสิ่งเจือปนไปยังด้านล่างของเหมือง จากจุดนี้ น้ำดินจะถูกผสมกับสารแขวนลอยและถูกบีบไปยังถังตกตะกอนขนาดใหญ่ซึ่งสิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่จะถูกตกตะกอนแยกออกไป ทำให้ในสารแขวนลอยดังกล่าวจะเหลือเพียงอนุภาคของดินและสิ่งเจือปนที่มีขนาดละเอียดกว่าเท่านั้น

ในขั้นตอนต่อมาสิ่งเจือปนในน้ำดินจะถูกแยกออกโดยการใส่ไฮโดรไซโคลอน (Hydrocyclones) สารแขวนลอยจะเกิดการหมุนเหวี่ยงอยู่ภายในทำให้สิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ถูกแรงเหวี่ยงหมุนออกมาอยู่ที่บริเวณด้านข้างของไฮโดรไซโคลอนจากนั้นจะตกลงสู่ด้านล่างและถูกกำจัดออกสู่ด้านนอกต่อไป อนุภาคที่มีขนาดละเอียดกว่าซึ่งจะอยู่บริเวณตรงกลางของแรงเหวี่ยงหมุนจะถูกเหวี่ยงไปทางด้านบนรวมเป็นองค์ประกอบของดินต่อไป หากทำการหมุนเหวี่ยงน้ำดินด้วยกระบวนการไฮโดรไซโคลอนต่อไป สิ่งเจือปนที่มีอนุภาคขนาด 30 ไมครอนจะถูกแยกออกเหลือไว้เพียงส่วนของวัตถุดิบที่มีความละเอียดมากๆและมีองค์ประกอบที่เป็นส่วนของดินรวมอยู่มากกว่า 95%

การใช้ไฮโดรไซโคลอนเพื่อกำจัดสิ่งเจือปนดังกล่าวให้ออกไปจากเนื้อดิน จะทำการกำจัดที่ขนาดอนุภาคละเอียดขึ้นที่ประมาณ 15 ไมครอน ทำให้ดินที่ได้มีความขาวและมีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูง ดินที่ได้จะถูกนำมาผ่านกระบวนการแยกน้ำออกจากเนื้อดินโดยการตกตะกอนหรือการอัดกรอง (Filter Pressing) และผ่านกระบวนการอบแห้งด้วยเตาชนิดพิเศษในขั้นตอนสุดท้าย

ปริมาณสิ่งเจือปนที่ปะปนอยู่ในเนื้อดินมีปริมาณที่น้อยทำให้ดินขาว (China Clays) มีสมบัติหลังเผาที่ดี ให้สีหลังเผาที่ขาวมากซึ่งจะตรงกันข้ามกับดินประเภททุติยภูมิ (Secondary Clays) ที่พบโดยส่วนใหญ่เนื่องจากดินประเภทนี้มีสิ่งเจือปนอยู่ในปริมาณมากทำให้ดินมีสีที่ขาว นวลหลังเผาและดินจากบางแหล่งอาจจะให้สีหลังเผาเป็นสีงาช้าง (Ivory) สีฟางข้าว (Straw) สีน้ำตาล (Brown) หรือสีแดง (Red) ซึ่งแล้วแต่แหล่งที่มาของดินนั้นๆ

ดินขาวโดยทั่วไปจะมีขนาดอนุภาคที่ค่อนข้างใหญ่ทำให้ความเหนียว (Plasticity) และความแข็งแรงก่อนเผา (Unfired Strength) น้อยกว่าดินที่จัดอยู่ในประเภทดินทุติยภูมิ (Secondary Clays) ดังนั้น ในเนื้อดินประเภท Bone China ซึ่งจำเป็นจะต้องให้ได้สีของเนื้อดินหลังเผาที่มีความขาว ผู้ผลิตจะใช้ดินประเภททุติยภูมิ (Secondary Clays) เป็นส่วนประกอบได้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นซึ่งจะทำให้เนื้อดินมีความเหนียว (Plasticity) และความแข็งแรงก่อนเผา (Unfired Strength) ที่เพิ่มขึ้นและอย่างที่ทราบคืออยู่แล้วว่าในทางทฤษฎีนั้นดินเคโอลิไนต์ (Kaolinite) บริสุทธิ์จะมีองค์ประกอบทางเคมีตามสูตร $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ถนัดกิจ ชาริรัตน์ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005) ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตา พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ส่งผลค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้น

T.W. Cheng และ J.P. Chiu (2003) ค้นพบว่าความเข้มข้นของสารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์สังเคราะห์จากตะกอนเหล็กมีความสัมพันธ์กับระยะเวลาในการก่อตัวสมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางกลของจีโอพอลิเมอร์

D. Hardjito and B.V. Rangan (2005) ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตา พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้นตามไปด้วย

ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ (2005) ได้ศึกษาการแช่ถั่วลันเตาโรงไฟฟ้าแม่เมาะในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าการละลายของ Si และ Al ในถั่วลันเตาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ และเวลาที่แช่อยู่ในสารละลายซึ่งระยะเวลาในการแช่สารละลายมีผลต่อการละลายของ Al มากกว่าการละลายของ Si

P. Chindaprasirt et.al. (2012) ศึกษาผลของปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมออกไซด์ต่อระยะเวลาในการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากถั่วลันเตาที่มีปริมาณแคลเซียมสูง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณซิลิกอนไดออกไซด์ หรืออะลูมิเนียมออกไซด์ มีผลทำให้เวลาในการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลง ซึ่งแตกต่างจากลักษณะของจีโอพอลิเมอร์โดยทั่วไปที่เมื่อปริมาณของอะลูมิเนียมออกไซด์เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เวลาในการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น แต่การเพิ่มซิลิกอนไดออกไซด์จะมีผลในการหน่วงเวลาการแข็งตัวของจีโอพอลิเมอร์

E. Nimwinya และคณะ (2016) ได้ศึกษาจีโอพอลิเมอร์จากดินตะกอนประปาพบว่าอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินาที่สูงขึ้นส่งผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราการควบแน่นของพันธะระหว่างซิลิกาเกิดกับอะลูมินาใช้ระยะเวลาการควบแน่นเร็วกว่าพันธะระหว่างซิลิกาเกิดกับซิลิกา และยังพบว่าเมื่อเพิ่มอัตราส่วนซิลิกาต่ออะลูมินารวมถึงเพิ่มอุณหภูมิในการบ่มจีโอพอลิเมอร์ให้ถึงจุดที่เหมาะสมจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีกำลังรับแรงอัดสูงขึ้น

Polomo et.al. (1999) ได้ทำการศึกษาการสังเคราะห์วัสดุจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตา พบว่า มีตัวแปรหลายตัวที่มีผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ซึ่ง ได้แก่ อุณหภูมิของการบ่มเวลาในการก่อตัว และชนิดของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา นอกจากนี้คณะวิจัยยังพบว่าอุณหภูมิการบ่มที่ทำให้จีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงสูงอยู่ในช่วง 60-90 องศาเซลเซียส

Hardjito et.al. (2004) ทำการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยที่มีองค์ประกอบของซิลิกาและอะลูมินาพบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่สามารถรับแรงอัดได้สูงที่ได้จากการผสมเถ้าลอยกับสารเร่งปฏิกิริยาและใช้ความร้อนอยู่ในช่วง 60 – 90 องศาเซลเซียสในการเร่งปฏิกิริยา สารเร่งที่ใช้เป็นสารพวกอัลคาไลน์ซิลิเกต และอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตามกำลังรับแรงอัดที่ได้จะขึ้นอยู่กับหลายตัวแปรเช่น ความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรืออัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้น

Wang และ Cheng (2003) ได้ทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยร่วมกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นทำการศึกษาสมบัติด้านความทนไฟในการทดลองพบว่าจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยสามารถแข็งตัวได้ที่อุณหภูมิห้องในช่วงระยะเวลา 9.5 ชั่วโมง หลังจากทำการบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน และทำการวัดค่ากำลังรับแรงอัดและสมบัติความทนไฟพบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ขึ้นให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 64 MPa โดยค่ากำลังรับแรงอัดมีการพัฒนาเพิ่มสูงขึ้นไปจนถึงการบ่ม 7 วัน หลังจากนั้นปฏิกิริยาที่ส่งผลให้เกิดความแข็งแรงจะเกิดขึ้นน้อยมาก สำหรับการทนไฟที่อุณหภูมิ 1100 องศาเซลเซียส ที่ด้านหน้าตัวอย่างความหนา 10 มิลลิเมตร ใช้เวลาเท่ากับ 30 นาที ทำการวัดอุณหภูมิที่ด้านหลังตัวอย่างได้เท่ากับ 440-470 องศาเซลเซียส พบว่าวัสดุจีโอพอลิเมอร์มีความแข็งแรงและสามารถทนไฟได้

สำริง รักซ้อน และคณะ (2011) ศึกษาผลของปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยพบว่า อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 1.5:1 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 12.5 โมลาร์ ให้กำลังรับแรงอัดที่สูงเมื่อเทียบกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 5, 7.5 และ 10 โมลาร์ ส่วนปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 โมลาร์ กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มที่ต่ำลง

Charin Sanawong (2010) และคณะ ทำการศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความทนแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย และกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างเหล็กข้ออ้อยกับจีโอพอลิเมอร์โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เท่ากับ 8, 10, 12 และ 14 โมลาร์ กำหนดอัตราส่วนของซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมคงที่เท่ากับ 1.98 และบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิห้องผลการศึกษพบว่าความทนแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ส่วนกำลังยึดเหนี่ยวระหว่างจีโอพอลิเมอร์กับเหล็กมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นและจะมีค่าลดลงเล็กน้อยที่ความเข้มข้น 14 โมลาร์

Charin Sanawong (2011) และคณะ ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยโดยใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายทำปฏิกิริยา ผลการวิจัยพบว่าจีโอพอลิเมอร์มีความสามารถในการกักเก็บคลอไรด์ได้สูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเพิ่มขึ้น

สกถวรรณ ห่านจิตสุวรรณ และคณะ (2015) ทำการศึกษาผลกระทบของการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยแคลเซียมต่ำและเถ้าลอยแคลเซียมสูง โดยการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในเถ้าลอย ร้อยละ 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน การศึกษาที่ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ เป็นสารละลายทำปฏิกิริยาโดยใช้ปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตร้อยละ 40 โดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ปริมาณของเหลวร้อยละ 33 และปริมาณวัสดุประสานเท่ากับร้อยละ 57 โดยน้ำหนัก ทำการบ่มที่อุณหภูมิห้องผลการทดสอบพบว่าปริมาณการแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความทนแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น

Palomo (2001) และคณะ ได้เสนอแนะว่าการกระตุ้นเถ้าลอยกับวัสดุผสมจะมีความแตกต่างกัน 2 รูปแบบคือ วัสดุที่ประกอบด้วยซิลิกอนไดออกไซด์และแคลเซียมจะถูกกระตุ้นด้วยสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยาประเภทต่างที่มีความเข้มข้นต่ำ สารที่ได้จากปฏิกิริยานี้คือแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) ในขณะที่ซิลิกอน และอะลูมิเนียมจะถูกกระตุ้นด้วยสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยาประเภทต่างความเข้มข้นสูงจะได้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) และเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์คือความร้อน ดังนั้น จึงต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิ ซึ่งอาจจะทำให้สูญเสียน้ำบางส่วนเล็กน้อย อย่างไรก็ตามการก่อตัวที่อุณหภูมิห้องก็สามารถทำได้ โดยใช้แหล่งวัสดุที่ผ่านการ แคลไซน์ที่ได้จากดินบริสุทธิเช่น แคลไซน์เกาลิน

Swanepoel และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์โดยใช้เถ้าลอยเป็นสารตั้งต้นร่วมกับแคลไซน์เกาลิน และใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกต สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายทำปฏิกิริยา จากนั้นทำการบ่มเพื่อเร่งปฏิกิริยา ที่อุณหภูมิ 40, 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดคือ 60 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ค่ากำลังแรงอัดสูงสุด คือ 8 MPa

อนุชาติ ลื่อนันต์ศักดิ์ศิริ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005) ได้ทำการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากแคลไซน์เกาลินผสมกับเถ้าลอยพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเตรียมแคลไซน์เกาลินเพื่อใช้ผสมกับเถ้าลอยคือ 600 องศาเซลเซียส และปริมาณของแคลไซน์เกาลินที่สามารถใช้ผสมกับเถ้าลอยได้มากที่สุดคือร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก หากใช้แคลไซน์เกาลินมากกว่าปริมาณดังกล่าวจะส่งผลให้ความทนแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลง

Abideng Hawa (2013) ได้ทำการศึกษาจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากแคลไซต์ไฮดรอกไซด์ สารละลายโซเดียมซัลไฟด์และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยาเพื่อใช้เป็นวัสดุเชื่อมประสานในงานซ่อมแซมผิวทางคอนกรีต ที่ต้องการการแข็งตัวที่รวดเร็วในการทดลองใช้ปริมาณน้ำร้อยละ 31, 35 และ 39 โดยน้ำหนักของแคลไซต์ไฮดรอกไซด์และบ่มร้อนเป็นเวลา 0.5, 1, 2 และ 4 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงอัดบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2, 6, 24 ชั่วโมง, 7 และ 28 วัน จากการทดสอบพบว่า จีโอพอลิเมอร์ที่ใช้ปริมาณน้ำร้อยละ 31 โดยน้ำหนักของแคลไซต์ไฮดรอกไซด์บ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะให้กำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 37 MPa

J. Xie และคณะ (2009) ได้ทำการเตรียมจีโอพอลิเมอร์จากแคลไซต์ไฮดรอกไซด์ เถ้าลอยโรงไฟฟ้าประเทศจีน และตะกรันเหล็ก พบว่าจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากส่วนผสมระหว่างแคลไซต์ไฮดรอกไซด์ เถ้าลอย และตะกรันเหล็กในอัตราส่วน ร้อยละ 14, 43 และ 43 โดยน้ำหนักตามลำดับให้ความแข็งแรงสูงถึง 31.6 MPa จีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมได้ยังสามารถเก็บกักโลหะหนัก เช่น Pb Cu Cr และ Ni ไว้ในตัวได้

P. Chindaprasirt และคณะ (2012) ศึกษาผลของปริมาณ SiO_2 และ Al_2O_3 ที่มีผลต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าลอยชั้นคุณภาพซี พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ SiO_2 หรือ Al_2O_3 มีผลทำให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่ลดลง แตกต่างจากลักษณะของจีโอพอลิเมอร์ที่เตรียมจากเถ้าลอยชั้นคุณภาพเอฟเมื่อเพิ่มปริมาณของ Al_2O_3 จะมีผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์เพิ่มขึ้นแต่หากปริมาณ SiO_2 เพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลง

ในปัจจุบันมีการค้นคว้าและวิจัยกันอย่างแพร่หลายเกี่ยวกับวัสดุจีโอพอลิเมอร์ แต่ยังไม่มียานวิจัยใดที่นำ แคลไซต์ไฮดรอกไซด์ ร่วมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ มาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่ใช้เถ้าลอย เป็นสารตั้งต้น งานวิจัยชิ้นนี้มีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอยด้วยการเติม แคลไซต์ไฮดรอกไซด์ และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพื่อให้ได้จีโอพอลิเมอร์ที่มีสมบัติเหมาะสมกับการใช้งานในอุตสาหกรรมการก่อสร้างด้านต่างๆ องค์ความรู้จากงานวิจัยชิ้นนี้ยังเป็นการปูพื้นฐานในการสร้างองค์ความรู้ใหม่ด้านเทคโนโลยีสะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมให้กับประเทศ เพื่อเตรียมพร้อมสู่การเป็นเศรษฐกิจและสังคมคาร์บอนต่ำและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย การวิเคราะห์ และการทดสอบแสดงดังตารางที่ 3.1 วัสดุคืบและสารเคมีที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.1 แสดงเครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินการวิจัย

| อุปกรณ์ | ผู้ผลิต | รุ่น |
|---|----------|----------------|
| กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) | - | QUANTA 450 |
| ไอออนสปัตเตอร์ริง (Ion sputtering device) | Joel | JFC-1110E |
| เอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction; XRD) | Bruker | D2 |
| เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence; XRF) | Horiba | XGT-5200 |
| เครื่องอัดขึ้นรูปแบบทิศทางเดียว (Uniaxial pressing) | Carver | 2702 |
| ตู้อบความร้อน (Drying oven) | Binder | ED240 |
| กิลล์มอร์นีดเดิลส์ (Gilmore needle ASTM C266) | Humboldt | H-3150 |
| เตา (Furnace) | Omega | OTG-6SP |
| เครื่องตัดชิ้นงานละเอียด (Precision wafering diamond saw) | Buehler | ISOMET 1000 |
| ตะแกรงคัดขนาด (Laboratory test sieve) | Retsch | #120 MESH |

ตารางที่ 3.2 แสดงสารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

| สารเคมี | ชนิด/เกรด | ผู้ผลิต |
|---|---|------------------------------|
| เถ้าลอย (Fly ash) | ชั้นคุณภาพซี | บมจ.คิปปี้ล เอ (1991) |
| ดินขาวระนอง (Ranong Clay) | - | - |
| สารละลาย โซเดียมซิลิเกต (Sodium silicate solution) | Commercial Grade (Na ₂ O= 16.3%, SiO ₂ =34.2%,H ₂ O=49.5%) | Kanto Chemical Co.,Ltd. |
| โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide) | Industry Grade 98% | Union Science Co.,Ltd. |
| ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ (Portland Cement) | type 1 | Siam City Cement Co.,Ltd. |

3.1.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ด (Sodium hydroxide pellets)

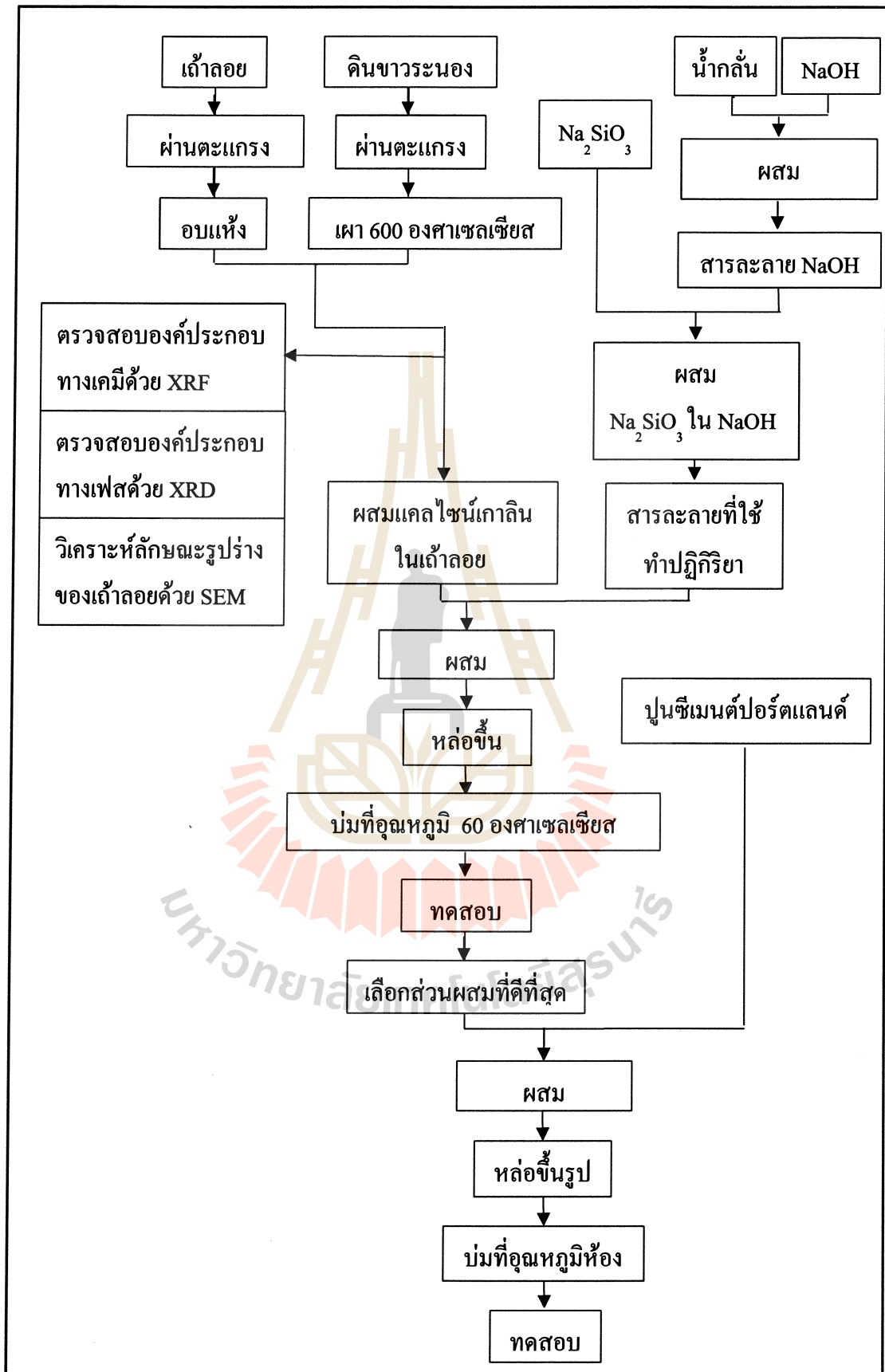
ในการทดลองใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเม็ด สูตรเคมี NaOH เกรดอุตสาหกรรมมีความบริสุทธิ์น้อยกว่าหรือเทียบเท่าร้อยละ 98 โดยน้ำหนัก สิ่งเจือปนอื่นๆร้อยละ 2 โดยน้ำหนัก (ข้อมูลจากบริษัท ยูเนียน ไซน์ จำกัด)

3.1.2 โซเดียมซิลิเกตชนิดสารละลาย (Sodium silicate solution)

โซเดียมซิลิเกตชนิดสารละลาย สูตรเคมี Na₂SiO₃ องค์ประกอบหลักโซเดียมออกไซด์ (Na₂O) ร้อยละ 16.3 โดยน้ำหนัก ซิลิกา (SiO₂) ร้อยละ 34.2 โดยน้ำหนัก และน้ำ (H₂O) ร้อยละ 49.5 โดยน้ำหนัก

3.2 การดำเนินการทดลอง

ขั้นตอนการดำเนินการทดลองแสดงในภาพที่ 3.1 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



3.2.1 การเตรียมตัวอย่างและแคลิซันท์แกลิน

3.2.1.1 ตัวอย่างจาก บริษัท ดีบีเอ็ม เอ (1991) จำกัด (มหาชน) จังหวัดปราจีนบุรี ถูกนำไปผ่านตะแกรงเบอร์ 120 Mesh เพื่อแยกสิ่งสกปรกออกก่อน

3.2.1.2 นำตัวอย่างที่ผ่านการคัดขนาดและแยกสิ่งสกปรกออกแล้วอบแห้งที่ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส จนแห้งสนิท

3.2.1.3 นำดินขาวระนองผ่านตะแกรงเบอร์ 120 Mesh เพื่อคัดขนาดผงดินและแยก สิ่งสกปรก

3.2.1.4 นำผงดินขาวเข้าเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาในการเผา แห้ง 3 ชั่วโมง อัตราการให้ความร้อนที่ 3 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.2.2 การทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างและแคลิซันท์แกลิน

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง เอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF) อาศัยหลักการยิงรังสีเอ็กซ์ไปกระทบชิ้นงานตัวอย่างส่งผลให้ชิ้นงาน ตัวอย่างเกิดการปล่อยโฟตอนที่ความยาวคลื่นเฉพาะตัวของธาตุแต่ละชนิดออกมา แล้วระบบทำการ วัดค่ารังสีที่กระเจิงออกมาแล้วทำการประมวลผล

เครื่องมือ : X-ray fluorescence (XRF) ดังแสดงในภาพที่ 3.2

ผู้ผลิต : HORIBA

รุ่น : XGT-5200



ภาพที่ 3.2 แสดงเครื่อง X-ray fluorescence (XRF)

วิธีการทดสอบ

3.2.2.1 เติมถ้ำลอยและแคลไซต์ลงในอุปกรณ์เตรียมตัวอย่าง (Sample holder)

3.2.2.2 นำอุปกรณ์เตรียมถ้ำลอยและแคลไซต์ใส่เข้าที่วางในเครื่อง XRF

3.2.2.3 ควบคุมการทดสอบด้วยระบบคอมพิวเตอร์

3.2.2.4 บันทึกผลการทดลองแล้วนำไปวิเคราะห์ต่อไป

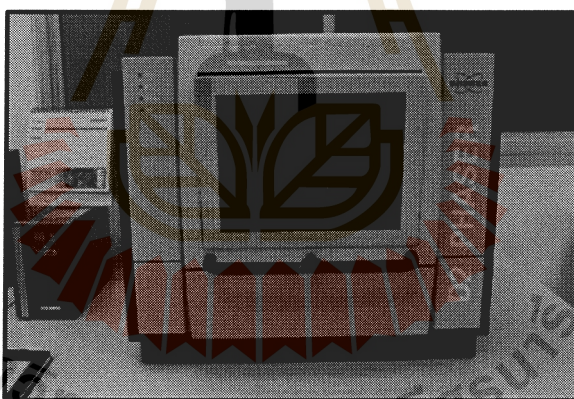
3.2.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของถ้ำลอยและแคลไซต์

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสอาศัยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) โดยเมื่อปล่อยรังสีเอ็กซ์ให้กระทบกับผลึกของชิ้นงานตัวอย่างจะเกิดการเลี้ยวเบนของรังสี การเลี้ยวเบนในช่วงมุมตกกระทบจะเป็นรูปแบบเฉพาะตัวของสารแต่ละชนิด

เครื่องมือ : X-ray diffractometer (XRD) ดังแสดงในภาพที่ 3.3

ผู้ผลิต : BRUKER

รุ่น : D2



ภาพที่ 3.3 แสดงเครื่อง X-ray diffractometer (XRD)

วิธีการทดสอบ

3.2.3.1 เติมถ้ำลอยและแคลไซต์ลงในช่องว่างของอุปกรณ์เตรียมตัวอย่างให้เต็มช่อง

3.2.3.2 ใช้แผ่นกระจกกดคดถึงถ้ำลอยและแคลไซต์ในอุปกรณ์เตรียมตัวอย่างให้แน่นและเรียบ

3.2.3.3 นำอุปกรณ์ใส่ตัวอย่างประกอบเข้าชุดแล้วนำเข้าเครื่องตรวจวิเคราะห์

3.2.3.4 บันทึกผลการทดลองแล้วนำไปวิเคราะห์ผลต่อไป

3.2.4 การวิเคราะห์ลักษณะและรูปร่างของเกล็ดลอย

การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของชิ้นงานมีความจำเป็นต้องอาศัยการสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนที่ตกกระทบกับพื้นผิวของชิ้นงาน การสะท้อนกลับของอิเล็กตรอนนั้นจะเกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่ซึ่งจะถูกนำมาแปลงเป็นสัญญาณและแสดงผลทางจอภาพ สามารถบันทึกและนำไปวิเคราะห์พื้นผิวของวัสดุได้โดยอิเล็กตรอนที่จะสามารถสะท้อนได้ก็ต่อเมื่อชิ้นงานมีพื้นผิวเป็นโลหะ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำการเคลือบผิวชิ้นงานด้วยโลหะทองคำ

เครื่องมือ : Ion sputtering device ดังแสดงในภาพที่ 3.4

ผู้ผลิต : Joel

รุ่น : JFC-1110E



ภาพที่ 3.4 แสดงเครื่อง Ion sputtering device

วิธีการทำงาน

3.2.4.1 ติดเทปคาร์บอนบนแท่นติดชิ้นงาน (Stub)

3.2.4.2 โรยผงเกล็ดลอยบริเวณเทปคาร์บอน

3.2.4.3 ใช้ลูกยางเป่าฝุ่นหรืออนุภาคส่วนเกิน

3.2.4.4 นำแท่นติดชิ้นงานเข้าเครื่อง Ion sputtering device ฉาบด้วยทอง

เครื่องมือ : Scanning electron microscope (SEM) ดังแสดงในภาพที่ 3.5

ผู้ผลิต : Joel

รุ่น : JSM-6010LV



ภาพที่ 3.5 แสดงเครื่อง Scanning electron microscope (SEM)

วิธีการทดสอบ

3.2.4.5 เตรียมตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ให้ได้ขนาด กว้างxยาวxสูง เป็น 5x5x5 มิลลิเมตร ตามลำดับ

3.2.4.6 นำตัวอย่างชิ้นงานตัวอย่างติดกับแท่นติดชิ้นงาน

3.2.4.7 เคลือบผิวของชิ้นงานตัวอย่างด้วยเครื่อง Ion sputtering device

3.2.4.8 นำตัวอย่างชิ้นงานที่เคลือบด้วยทองแล้วเข้าเครื่อง SEM

3.2.4.9 ควบคุมการทดสอบโดยใช้คอมพิวเตอร์

3.2.4.10 บันทึกผลการทดลองที่ได้ แล้วนำผลไปวิเคราะห์ต่อไป

3.2.5 การเตรียมต่างสำหรับใช้ทำปฏิกิริยา

3.2.5.1 คำนวณปริมาณ โซเดียมไฮดรอกไซด์และน้ำให้ได้สารละลายความเข้มข้น 5,10 และ 15 โมลาร์ ตามสมการที่ 3.1

$$n = gMW \quad (3.1)$$

$$g = \frac{n}{MW}$$

เมื่อ n คือ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
 g คือ ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)
 MW คือ น้ำหนักโมเลกุลของโซเดียมไฮดรอกไซด์

3.2.5.2 ผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์จากการคำนวณในข้อ 3.2.5.1 กับน้ำกลั่น

3.2.5.3 ชั่งน้ำหนักสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เตรียมไว้

3.2.5.4 ชั่งน้ำหนักสารละลายโซเดียมซัลเฟตเป็น 0,0.5,1.0,1.5 และ 2.0 โดยน้ำหนักของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ทำการผสมให้เข้ากัน บ่มสารละลายทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนนำไปใช้งาน

3.2.6 การขึ้นรูปชิ้นงาน

3.2.6.1 ผสมเถ้าลอยและแคลไซต์เกรดลินให้ได้สัดส่วนเถ้าลอยต่อแคลไซต์เกรดลินเป็น 100:0, 50:50, 40:60, 30:70 และ 0:100 โดยน้ำหนัก

3.2.6.2 ผสมสารละลายที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.5.4 กับผงที่เตรียมได้จากข้อที่ 3.2.6.1

3.2.6.3 ขึ้นรูปชิ้นงาน โดยการเติมส่วนผสมลงในแบบหล่อลูกบาศก์ที่มีขนาดความกว้างxยาวxสูง เป็น 5x5x5 มิลลิเมตร ตามลำดับ และทำการไล่ฟองอากาศออก ตามมาตรฐาน ASTM C109

3.2.6.4 จีโอฟอลิเมอร์ที่ขึ้นรูปแล้วจะถูกนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นระยะเวลา 7 วัน

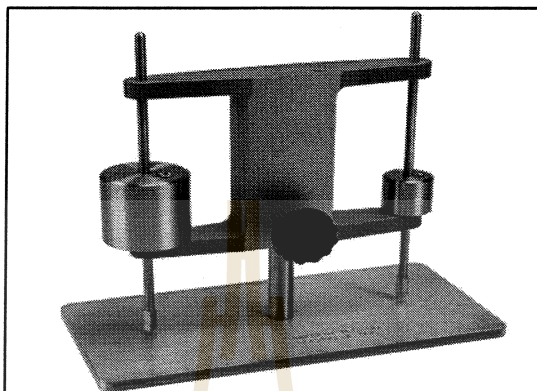
3.2.7 การวัดเวลาในการก่อตัว

เวลาในการก่อตัวของจีโอฟอลิเมอร์ ทดสอบโดยกิลล์มอร์นิตเคิลส์ ตามมาตรฐาน ASTM C266 เข้มที่ใช้สำหรับวัดเวลาในการก่อตัวมีน้ำหนัก 113.4 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มมีขนาด 2.12 มิลลิเมตร และเข็มวัดเวลาสิ้นสุดการก่อตัวของจีโอฟอลิเมอร์มีน้ำหนัก 453.6 กรัม เส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มมีขนาด 1.06 มิลลิเมตร เวลาในการก่อตัวถูกบันทึกเมื่อปลายเข็มทั้งสองไม่สามารถกดชิ้นงานให้เป็นรอยเต็มวงกลมได้

เครื่องมือ : Gilmore needle ดังแสดงในภาพที่ 3.6

ผู้ผลิต : Humboldt

รุ่น : H-3150



ภาพที่ 3.6 แสดงเครื่อง Gilmore needle

วิธีการทดสอบ

3.2.7.1 วัดค่าเวลาในการเริ่มก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์โดยการยกเข็มฝั้งเริ่มก่อตัวขึ้นแล้วนำชิ้นงานวางลงที่แน่นอน

3.2.7.2 ปลดเข็มให้ปลายเข็มสัมผัสกับชิ้นงานจีโอพอลิเมอร์เบาๆและปล่อยมือ

3.2.7.3 ทำการจดบันทึกเวลาเมื่อปลายเข็มไม่สามารถกดผิวชิ้นงาน ให้เป็นรอยเต็มวงกลมได้

3.2.7.4 วัดค่าเวลาสิ้นสุดการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์โดยทำการยกเข็มฝั้งสิ้นสุดการก่อตัวขึ้น ทำซ้ำข้อที่ 3.2.7.2 – 3.2.7.3

3.2.7.5 บันทึกผลการทดลองที่ได้ แล้วนำผลไปวิเคราะห์ต่อไป

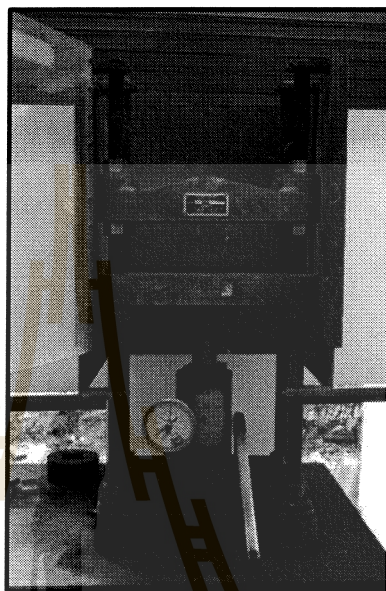
3.2.8 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบความแข็งแรงของจีโอพอลิเมอร์ โดยทดสอบกำลังรับแรงอัดของชิ้นงาน ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M โดยเครื่อง Uniaxial press ดังภาพที่ 3.7 เครื่องดังกล่าวเป็นเครื่องอัดไฮดรอลิกชนิดควบคุมด้วยมือ เมื่อชิ้นงานได้รับแรงอัดจนเกินกำลังรับแรงอัด ชิ้นงานจะแตกออกจนบันทึกค่าแรงกดที่ทำให้ชิ้นงานแตก และนำค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ผลต่อไป

เครื่องมือ : Uniaxial press

ผู้ผลิต : Carver

รุ่น : 2702



ภาพที่ 3.7 เครื่องมือ Uniaxial press

วิธีการทดสอบ

3.2.8.1 นำชิ้นงานตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ที่ต้องการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดจำนวนชิ้นงานสุตรละ 3 ชิ้นตัวอย่าง วางบริเวณจุดกึ่งกลางแผ่นพื้นด้านล่างแล้วทำการปิดฝา ด้านหน้าเครื่องเพื่อป้องกันอันตรายจากการกระเด็นของเศษชิ้นงาน โดยทำการทดสอบครั้งละ 1 ชิ้นงาน

3.2.8.2 โยกคัน โยกให้แผ่นพื้นด้านล่างเลื่อนขึ้นไปอัดชิ้นงานอย่างช้าๆและสม่ำเสมอ

3.2.8.3 เมื่อชิ้นงานตัวอย่างเริ่มแตกและค่าบนเกจวัดคงที่ให้ทำการบันทึกค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่อัดได้

3.2.8.4 บันทึกผลการทดลองแล้วนำผลไปวิเคราะห์ต่อไป

วิธีการคำนวณค่ากำลังรับแรงอัดในหน่วยเมกะปาสคาล (MPa) แสดงในสมการที่ (3.2)

$$fm = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

| | | |
|----------|------|---|
| กำหนดให้ | fm | คือ ค่ากำลังรับแรงอัดในหน่วย [MPa] |
| | P | คือ ค่าแรงอัดสูงสุดในหน่วย [N] |
| | A | คือ พื้นที่รับแรงของชิ้นงานตัวอย่างในหน่วย [mm ²] |

3.2.9 การวัดความหนาแน่น

ชิ้นงานตัวอย่างถูกวัดความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM C373-88 วิธีการวัดความหนาแน่นมีดังต่อไปนี้

3.2.9.1 นำชิ้นงานตัวอย่างจีโอพอลิเมอร์ผ่านการบ่มไปอบในตู้อบที่ตั้งอุณหภูมิไว้ 60 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักแห้ง (W_D)

3.2.9.2 นำชิ้นงานแช่ลงในน้ำกลั่นแล้วนำไปใส่หม้อดูดสุญญากาศเพื่อไล่อากาศออกจากชิ้นงานเป็นเวลา 6-12 ชั่วโมงและเพื่อให้ น้ำแทรกซึมเข้าไปภายในชิ้นงาน โดยควบคุมให้น้ำท่วมชิ้นงานตลอดเวลา

3.2.9.3 นำชิ้นตัวอย่างในข้อที่ 3.2.9.2 มาทำการชั่งน้ำหนักแฉนวนลอยในน้ำ (W_{SS}) และชั่งน้ำหนักอิมเมอร์ชันด้วยน้ำ (W_S) โดยใช้ผ้าชุบน้ำบริเวณผิวภายนอกของชิ้นงานออกแล้วจึงทำการชั่งน้ำหนัก

3.2.9.4 นำผลที่ได้ไปคำนวณค่าความหนาแน่น ดังสมการที่ (3.3)

เมื่อ V คือปริมาตรของตัวอย่าง

$$V = W_S - W_{SS}$$

สมการคำนวณความหนาแน่นของตัวอย่าง

$$\text{Bulk density} = \frac{W_D}{(W_S - W_{SS})} \quad (3.3)$$

3.2.10 การศึกษาผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

ส่วนผสมของจีโอพอลิเมอร์ที่มีค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดจะถูกเลือกเพื่อนำมาเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 5,10 และ 15 โดยน้ำหนัก จากนั้นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ดังกล่าวจะถูกนำไปทดสอบการก่อดังอธิบายในหัวข้อ 3.2.7 รวมถึงทดสอบสมบัติค่ากำลังรับแรงอัดและความหนาแน่น ดังอธิบายในหัวข้อ 3.2.8 และ 3.2.9 ตามลำดับ

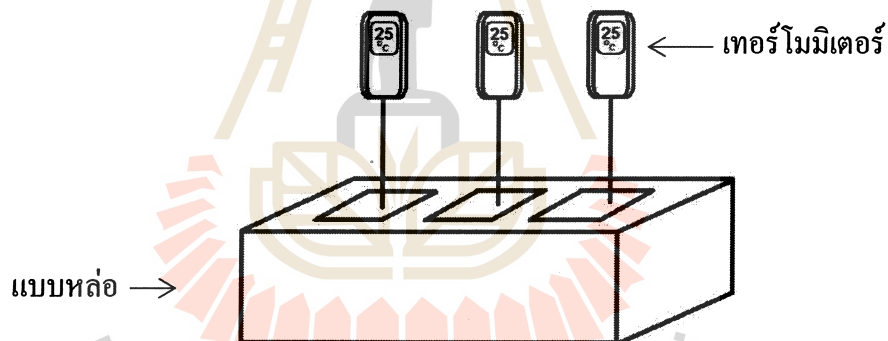
3.2.11 การทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นระหว่างการก่อดังของจีโอพอลิเมอร์

การวัดอุณหภูมิในการก่อดังของจีโอพอลิเมอร์สำหรับชิ้นงานตัวอย่างที่เติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ปริมาณร้อยละ 5,10 และ 15 โดยน้ำหนัก ด้วยเทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) วิธีวัดอุณหภูมิดังแสดงในภาพที่ 3.8

เครื่องมือ : Thermometer

ผู้ผลิต : -

รุ่น : KT-300



ภาพที่ 3.8 แสดงวิธีการวัดอุณหภูมิ

วิธีการวัดอุณหภูมิ

3.2.11.1 วัดอุณหภูมิของจีโอพอลิเมอร์โดยการวางเข็มของเทอร์โมมิเตอร์ให้สัมผัสกับชิ้นงาน

3.2.11.2 ดันปลายเข็มเทอร์โมมิเตอร์ให้เข้าไปอยู่ภายในกึ่งกลางของชิ้นงาน โดยทำการวัดอุณหภูมิ ตัวอย่างสูตรละ 3 ชิ้นงาน

3.2.11.3 ทำการบันทึกอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ แล้วนำผลไปวิเคราะห์ต่อไป

3.2.12 การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์

วัสดุจีโอพอลิเมอร์จะถูกทำการตรวจสอบพื้นผิวรอยแตก (Fracture face) โดยการหักชิ้นงานแล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยมีวิธีการดังอธิบายในข้อที่ (3.2.4)



บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและแคลไชน์เกาลิน

ผลการศึกษารายละเอียดองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าลอยและแคลไชน์เกาลินด้วยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (X-ray fluorescence, XRF) แสดงในตารางที่ 4.1 จากผลการทดลองพบว่าเถ้าลอยมีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบร้อยละ 33.19 และ 19.68 ตามลำดับ เถ้าลอยซึ่งมีอะลูมินาและซิลิกาเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนดังกล่าวจัดอยู่ในชั้นคุณภาพซี (Class C) ตามมาตรฐาน ASTM C618

แคลไชน์เกาลินหลังผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง มีซิลิกาและอะลูมินาเป็นองค์ประกอบร้อยละ 49.40 และ 48.48 ตามลำดับ ด้วยการผสมแคลไชน์เกาลินกับเถ้าลอย จะส่งผลให้สามารถควบคุมปริมาณอัตราส่วนระหว่างซิลิกอน (Si) ต่ออะลูมิเนียม (Al) ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการใช้งาน เนื่องจากอัตราส่วนดังกล่าวส่งผลโดยตรงต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ เช่น ความแข็งแรง ระยะเวลาในการก่อตัว และปริมาณรูพรุน เป็นต้น

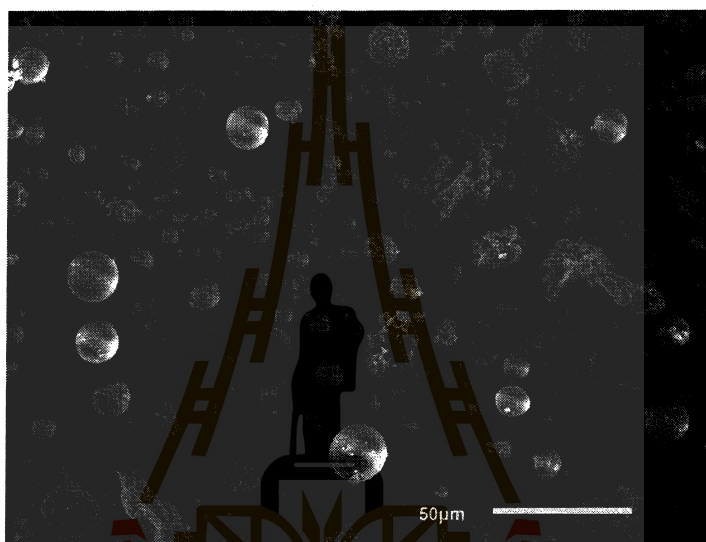
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุคืบด้วยเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์

| วัสดุคืบ | องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยน้ำหนัก) | | | | | | | | | | |
|---------------|--------------------------------------|------------------|------------------|-------------------|-------|------|--------------------------------|------------------|-----------------|------|------|
| | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | K ₂ O | Na ₂ O | CaO | MgO | Fe ₂ O ₃ | TiO ₂ | SO ₃ | CdO | Etc. |
| แคลไชน์เกาลิน | 48.48 | 49.40 | 0.99 | 0.08 | 0.01 | 0.12 | 0.68 | 0.03 | 0.04 | - | 0.17 |
| เถ้าลอย* | 19.68 | 33.19 | 2.29 | 2.40 | 11.93 | 4.43 | 10.65 | 0.76 | 3.86 | 9.76 | 1.05 |

เถ้าลอย จาก บริษัท คีบีบี เอ (1991) จำกัด (มหาชน)

4.2 ผลการวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างของถ้ำลอย

อนุภาคของถ้ำลอยซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) แสดงในภาพที่ 4.1 ลักษณะอนุภาคของถ้ำลอยโดยส่วนใหญ่มีรูปร่างไม่สม่ำเสมอ (Irregular) และอนุภาคบางส่วนมีลักษณะเป็นทรงกลม (Sphere) โดยทั่วไปแล้วถ้ำลอยที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารละลายต่างเพื่อเปลี่ยนเป็นวัสดุจีโอพอลิเมอร์ได้คือนั้นมักมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลม (A. Fernandez-Jimenez, A. Palomo ,M. Criado, Fuel.,2003,2005)

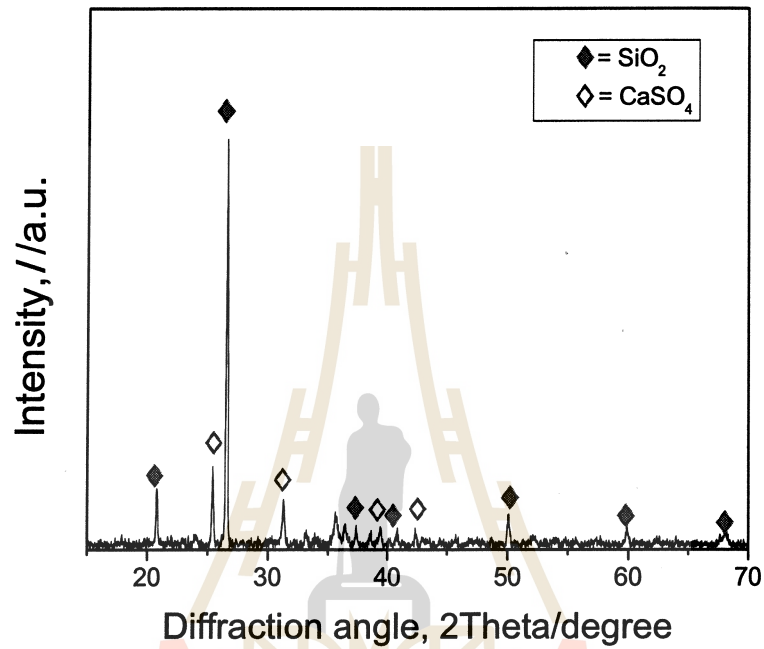


ภาพที่ 4.1 รูปร่างของถ้ำลอยซึ่งถูกถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 1000 เท่า

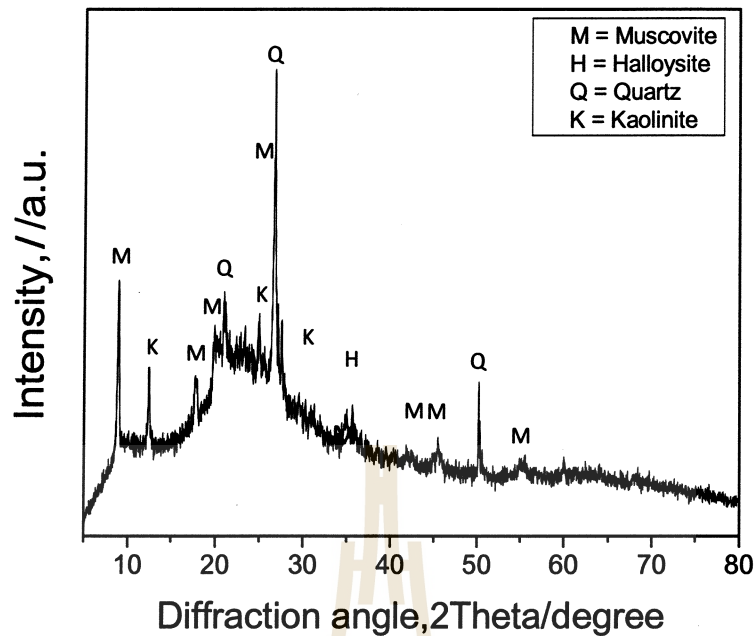
4.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของถ้ำลอย และแคลไซต์เนกาทีฟ

ภาพที่ 4.2 และ ภาพที่ 4.3 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเฟสของถ้ำลอยและแคลไซต์เนกาทีฟด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-ray diffractometer, XRD) ตามลำดับจากภาพพบว่าถ้ำลอยมีผลึกของควอตซ์และแคลเซียมซัลเฟต เป็นองค์ประกอบหลัก จากรูปร่างของถ้ำลอย (ดังแสดงในภาพที่ 4.1) และผลของการวิเคราะห์ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์แสดงให้เห็นว่า ถ้ำลอยที่ใช้ในการทดลองนี้จัดอยู่ในกลุ่มถ้ำลอยที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลได้ยาก โดยทั่วไปแล้วถ้ำลอยที่เกิดปฏิกิริยาได้คิมักอยู่ในรูปอสัณฐาน (Amorphous) และอยู่ในรูปทรงกลม (ปริญา จินดาประเสริฐ, 2549) ในขณะที่ถ้ำลอยที่เกิดปฏิกิริยาได้ยากมักมีรูปร่างไม่สม่ำเสมอและอยู่ในรูปผลึกเนื่องจากเตาที่ใช้ในการเผาถ้ำลอยมีอุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้อุณหภูมิไม่สูงพอที่จะทำให้ถ้ำลอยถูกหลอมให้อยู่ในรูปอสัณฐาน

ในขณะที่รูปแบบพีคของแคลไซต์ (ภาพที่ 4.3) แสดงลักษณะของอสัณฐาน (Amorphous) ประกอบไปด้วยมัสโคไวท์ (Muscovite), แฮลลอยไซต์ (Halloysite), ควอตซ์ (Quartz), และกาโอลินไนท์ (Kaolinite) ซึ่งเป็นรูปแบบที่แสดงถึงความพร้อมของแคลไซต์ในการทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ (Alkaline solution) (กนกวรรณ และคณะ, 2533)



ภาพที่ 4.2 ผลวิเคราะห์ทางเฟสของถ้ำลอย



ภาพที่ 4.3 ผลวิเคราะห์ทางเฟสของแคลไซต์กาแลนิน

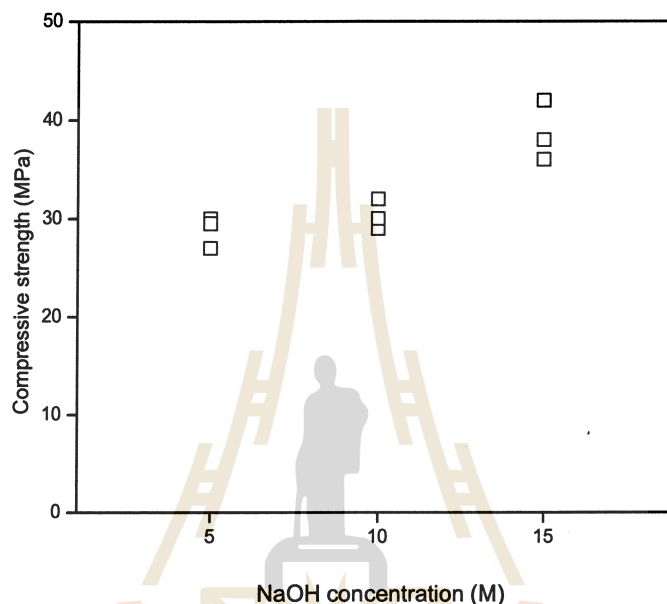
4.4 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

การศึกษาผลความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ ทุกตัวอย่างจะถูกเตรียมด้วยสภาวะควบคุมเดียวกัน ได้แก่ อัตราส่วนแคลไซต์กาแลนินต่อเถ้าลอยที่ 50:50 โดยน้ำหนัก อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 1.5 อัตราส่วนผงต่อสารละลายที่ 1:1 เนื่องจากเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมต่อการผสมและการขึ้นรูปชิ้นงาน อุณหภูมิในการบ่มชิ้นงานที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน ตัวแปรดังกล่าวที่นำมาใช้ในการทดลองถูกอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่ส่งผลต่อสมบัติที่ดีของจีโอพอลิเมอร์ (ณัฐ มากุล และคณะ, 2556, อาภากร พรหมเพชร, 2556, ชรินทร์ เสนาวงษ์, 2554, Abideng Hawa, 2556, Hai Yan Zhang, 2014) โดยการทดลองใช้ชิ้นงานตัวอย่างจำนวนสุตรละ 3 ชิ้น ในการทดสอบค่าต่างๆ

4.4.1 ผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

ภาพที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าสูงขึ้น โดยความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15 โมลาร์ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยสูงถึง 42 MPa เนื่องจาก

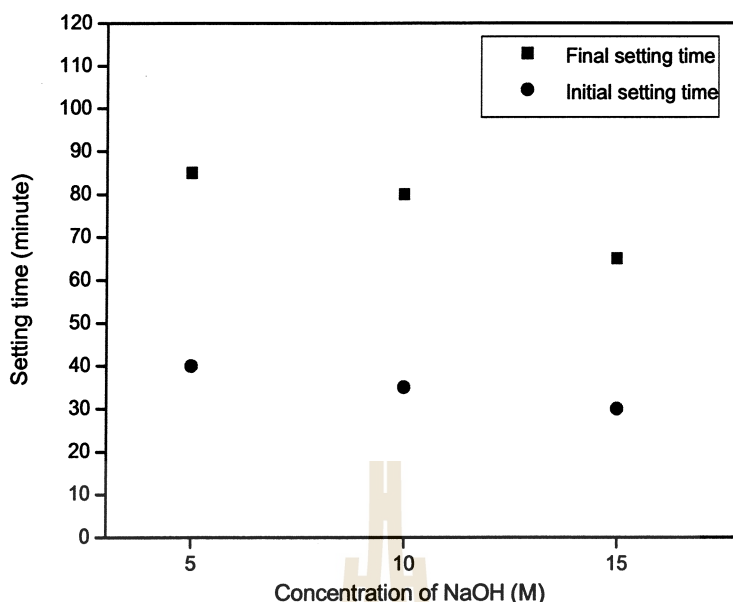
ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นส่งผลให้ความสามารถในการชะล้างพันธะของซิลิกาและอะลูมินาจากสารตั้งต้น (แก้วลอยผสมแคลไซต์-ไฮดรอกไซด์) ให้แตกตัวเป็นไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมได้มากขึ้น (Ekkasit, N.,2016) ทำให้ปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดขึ้น จากนั้นโซเดียมซิลิเกตจะทำหน้าที่ในการจัดเรียงพันธะใหม่ทำให้เกิดการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ขึ้น



ภาพที่ 4.4 แสดงผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์
ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

4.4.2 ผลความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์แสดงในภาพที่ 4.5 เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มมากขึ้น ระยะเวลาในการก่อตัวมีแนวโน้มที่ลดลง เนื่องจากสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูง ส่งผลให้กระบวนการแตกตัว หรือ ความสามารถในการชะละลายไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมได้ดีขึ้น (ปริญญา จินดาประเสริฐ และคณะ, 2005) ส่งผลให้อะลูมิเนียมไอออนและซิลิกอนไอออนมีปริมาณมากขึ้น ทำให้กระบวนการจัดเรียงตัวเพื่อสร้างพันธะใหม่เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว (บุรฉัตร ฉัตรวีระ และคณะ, 2555) เวลาในการก่อตัวของ จีโอพอลิเมอร์จึงลดลง



ภาพที่ 4.5 แสดงผลของความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

4.5 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

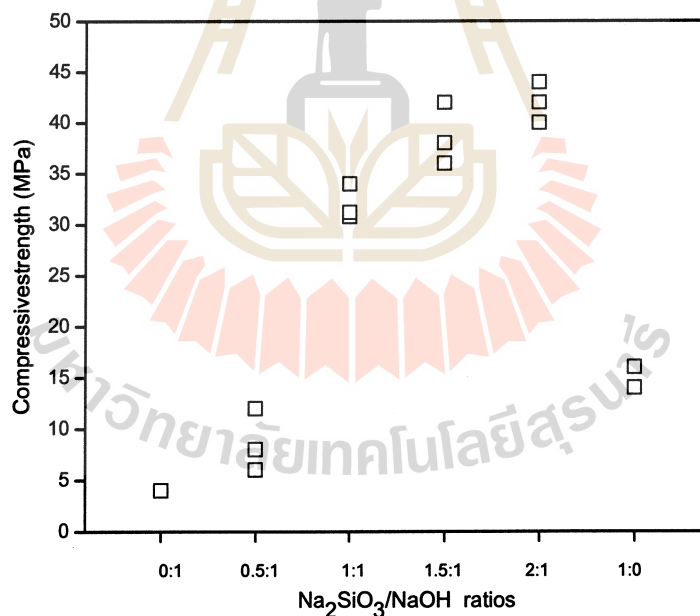
การศึกษาสมบัติของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอยโดยการปรับเปลี่ยนอัตราส่วนของสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และทำการควบคุมตัวแปรอื่นๆที่จะส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกลของ จีโอพอลิเมอร์ ในการศึกษาสภาวะดังกล่าวได้ทำการควบคุมตัวแปรอื่นที่มีผลต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์ให้คงที่ โดยทำการควบคุมอัตราส่วนแคลเซียมแกลินต่อเถ้าลอยที่ 50:50 โดยน้ำหนัก (อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา) ควบคุมความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 โมลาร์ (อ้างอิงจากผลการทดลองในข้อ 4.4) อัตราส่วนผงต่อสารละลายที่ 1:1 (อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา) และอุณหภูมิในการบ่มชิ้นงานที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน ทุกชิ้นงาน (อ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมา) โดยการทดลองใช้ชิ้นงานตัวอย่างจำนวนสูตรละ 3 ชิ้น ในการทดสอบค่าต่างๆ

4.5.1 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

เมื่ออัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงขึ้น (โซเดียมซิลิเกตเพิ่มขึ้น) ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.6 บทบาทของโซเดียมซิลิเกตในกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันคือ ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสาน (Binder)

เพื่อสร้างสายโซ่จีโอโพลิเมอร์ (Geopolymer chain) (S.E. Wallah and B.V. Rangan, 2006) การเพิ่มปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตมีผลให้ตัวเชื่อมประสานพันธะเพิ่มมากขึ้นจึงสามารถเชื่อมประสานพันธะใหม่ได้ดีและสร้างความแข็งแรงให้กับพันธะรวมถึงทำให้กระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์สูงขึ้น

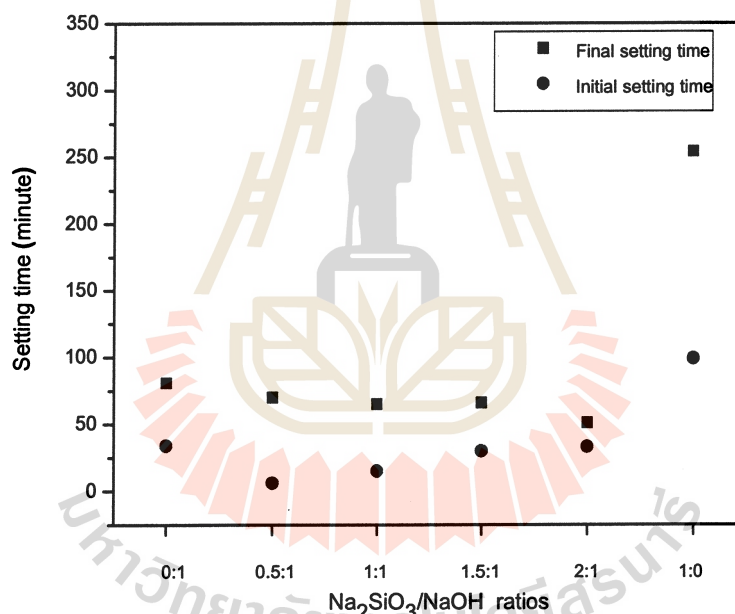
อย่างไรก็ตาม จีโอโพลิเมอร์มีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อใช้โซเดียมซิลิเกตหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงลำพัง (อัตราส่วนระหว่างโซเดียมซิลิเกตต่อโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 1:0 และ 0:1 ตามลำดับ) เนื่องจากเมื่อขาดโซเดียมไฮดรอกไซด์จะส่งผลให้กระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันขาดสารที่ทำหน้าที่ในการแยกไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียม ในทำนองเดียวกัน เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพียงอย่างเดียว กระบวนการจีโอโพลิเมอร์ไรเซชันก็จะขาดสารที่ทำหน้าที่ในการเชื่อมประสานไอออนของซิลิกอนและอะลูมิเนียมเพื่อให้เกิดพันธะใหม่ ดังนั้นการที่จะได้วัสดุจีโอโพลิเมอร์ที่ให้ค่ากำลังรับแรงอัดสูงจึงต้องใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร่วมกับโซเดียมซิลิเกต ไม่สามารถใช้สารละลายชนิดใดชนิดหนึ่งตามลำพัง



ภาพที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับกำลังรับแรงอัด

4.5.2 ผลของอัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์แสดงในภาพที่ 4.7 เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์สัมพันธ์กับการเกิดกระบวนการจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน ซึ่งอาศัยโซเดียมไฮดรอกไซด์ทำหน้าที่เป็นตัวชะละลายอะลูมิเนียมและซิลิกอนจากสารตั้งต้น (ถ้าลอยผสมกับดินขาวเผา) และใช้โซเดียมซิลิเกตทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานก่อให้เกิดพันธะใหม่ จากผลการทดลองพบว่าหากขาดสารข้างต้นตัวใดตัวหนึ่งจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ใช้เวลาในการก่อตัวนานในทางกลับกัน เมื่อใช้สารละลายทั้งสองร่วมกันเวลาที่ใช้ในการก่อตัวมีแนวโน้มที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา (Eslam Gomaa, et al., 2017, P. Duxson et al., 2007, Ekkasit N., 2016)



ภาพที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์กับเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

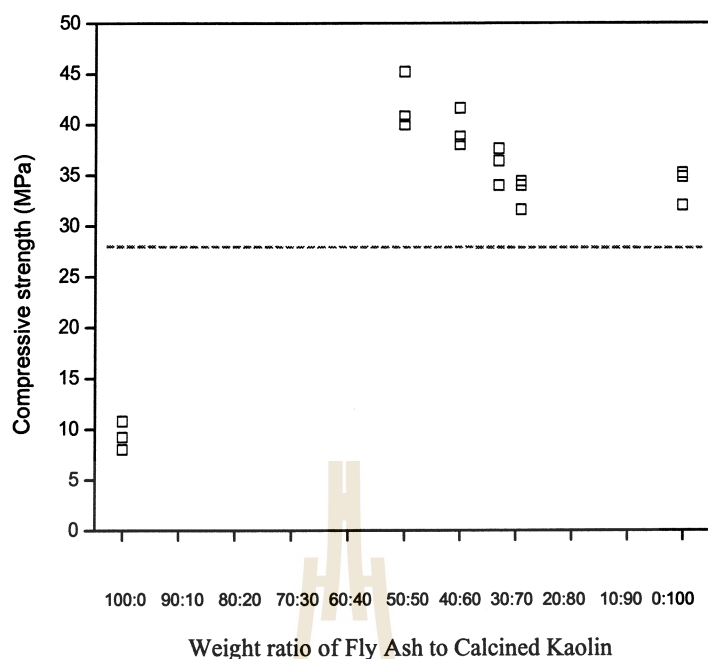
4.6 ผลการแทนที่ถ้าลอยด้วยแคลไซต์แก่ลิโนต่อสมบัติของจีโอพอลิเมอร์

ตัวอย่างทุกตัวอย่างถูกเตรียมด้วยสภาวะควบคุมเดียวกันอันได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 15 โมลาร์ (อ้างอิงจากผลการทดลองข้อ 4.4) อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 2:1 (อ้างอิงจากผลการทดลองข้อ 4.5) อัตราส่วนผงวัสดุคิบต่อสารละลายมีค่าเท่ากับ 1:1 (อ้างอิงจาก

งานวิจัยที่ผ่านมา) ทุกตัวอย่างถูกบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 7 วัน โดยการทดลองใช้ชิ้นงานตัวอย่างจำนวนสุทธละ 3 ชิ้น ในการทดสอบค่าต่างๆ

4.6.1 ผลของการแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์ในเกาลินต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์

ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ แสดงในภาพที่ 4.8 เมื่อใช้เถ้าลอย 100 % เป็นวัตถุดิบในการขึ้นรูปจีโอพอลิเมอร์พบว่าค่าความแข็งแรงของชิ้นงานมีค่าเท่ากับ 9 MPa ซึ่งค่าดังกล่าวต่ำกว่าค่าความแข็งแรงขั้นต่ำของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ซึ่งมีค่ากำลังรับแรงอัดหลังบ่ม 7 วันเท่ากับ 28 MPa หากใช้แคลไซต์ในเกาลินเพียงอย่างเดียว 100 % หลังการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงอัดวัดค่าได้ 34 MPa ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์ในเกาลินในปริมาณร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก (ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าเฉลี่ยที่ 42 MPa) เนื่องจาก แคลไซต์ในเกาลินสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารละลายต่างได้ดี ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชัน (Geopolymerization) เกิดได้ดีขึ้น (Zuhua et al., 2014) อีกทั้งการแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์ในเกาลินยังมีผลในการปรับสัดส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม (Si : Al) ให้มีค่าเข้าใกล้อัตราส่วน 2:1 ถึง 3:1 (ดังแสดงในตารางที่ 4.2) ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์มีค่ากำลังรับแรงอัดที่สูง (สมิตร และคณะ., 2551, Davidovits., 1988) อย่างไรก็ตามเมื่อแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์ในเกาลินเกินกว่าร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสัดส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลง อาจเกิดสัดส่วนที่ไม่เหมาะสม (สัดส่วนที่เหมาะสมคือ 2:1) จึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดที่ได้มีค่าลดลง การเติมแคลไซต์ในเกาลินในเถ้าลอยเท่ากับร้อยละ 70 โดยน้ำหนักพบว่าค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าใกล้เคียงกับการใช้แคลไซต์ในเกาลินเพียงอย่างเดียว 100 % อาจเนื่องมาจากสัดส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมของเถ้าลอยที่เติมแคลไซต์ในเกาลินร้อยละ 70 โดยน้ำหนักมีค่าใกล้เคียงกันจึงทำให้ค่ากำลังรับแรงอัดมีค่าต่างกันไม่มาก



ภาพที่ 4.8 ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์กาอลินในปริมาณต่างๆ และ ----- คือค่ากำลังรับแรงอัดปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อุณหภูมิห้อง

*ตารางที่ 4.2 แสดงผลการคำนวณอัตราส่วน Si/Al

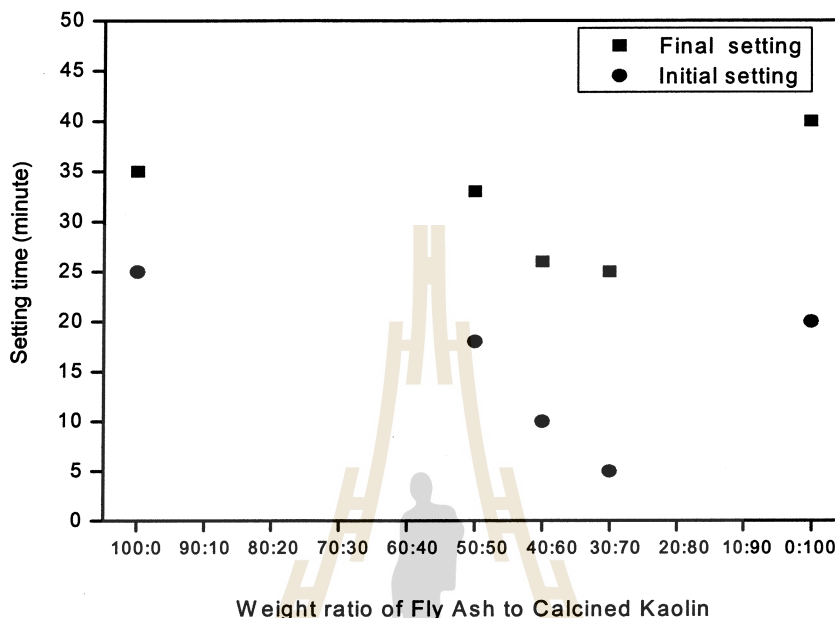
| Composition (Weight%) | | Si/Al ratio |
|-----------------------|----------------|-------------|
| Fly Ash | Calcine kaolin | |
| 100 | 0 | 2.4 |
| 50 | 50 | 1.6 |
| 40 | 60 | 1.5 |
| 30 | 70 | 1.4 |
| 0 | 100 | 1.3 |

* รายละเอียดคำนวณแสดงในภาคผนวก ข

4.6.2 ผลการแทนที่เถ้าลอยด้วยแคลไซต์กาอลินต่อเวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์

ภาพที่ 4.9 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์จากภาพพบว่าเมื่อปริมาณแคลไซต์กาอลินเพิ่มขึ้น เวลาในการก่อตัวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากสัดส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียมส่งผลโดยตรงต่อเวลา การก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ (E. Nimwinya et al.,2016) จากตารางที่ 4.2 พบว่าเมื่อปริมาณการแทนที่แคลไซต์กาอลินเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้สัดส่วนระหว่าง

ซิติคอนต่ออะลูมิเนียมมีแนวโน้มลดลง แนวโน้มดังกล่าวส่งผลให้ระยะเวลาการก่อตัวของ จีโอพอลิเมอร์ลดลง เนื่องจากการควบแน่นของพันธะระหว่างซิติเกตกับอะลูมิเนียมแต่ใช้ เวลาในการควบแน่นเร็วกว่าพันธะระหว่างซิติเกตกับซิติเกต (P. Chindaprasirt, et al.,2012)



ภาพที่ 4.9 แสดงเวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ที่มีการแทนที่ด้วยแคลไซต์ในปริมาณต่างๆ

4.7 ผลการแทนที่ผงจีโอพอลิเมอร์ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อสมบัติของ จีโอพอลิเมอร์

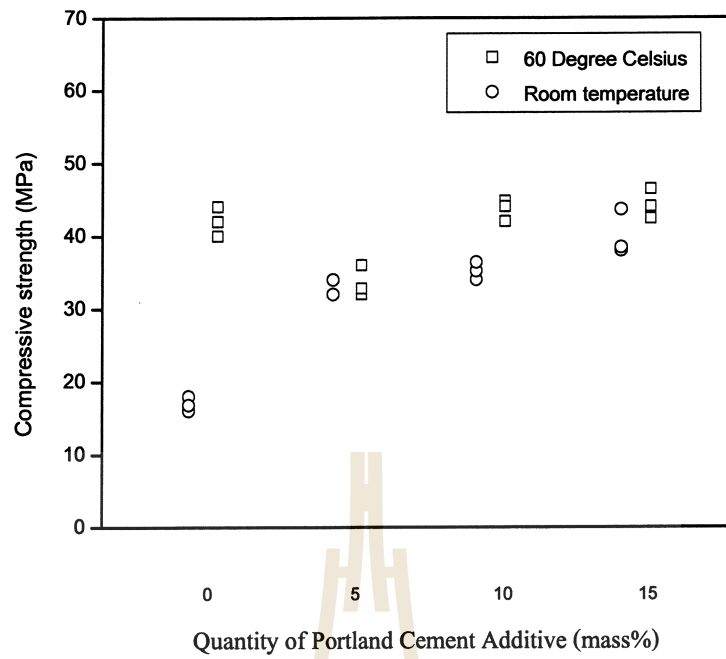
ผลของการแทนที่ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ถูก แสดงในภาพที่ 4.10 โดยทำการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสและตัวอย่างบ่มที่อุณหภูมิห้อง ตัวอย่างทุกตัวอย่างถูกเตรียมด้วยสภาวะควบคุม เดียวกันอันได้แก่ อัตราส่วนระหว่างแคลไซต์แก่ลยต่อแฉัลลยเท่ากับ 50:50 ความเข้มข้นของ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 15 โมลาร์ อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิติเกต ต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่าเท่ากับ 2:1 อัตราส่วนผงวัตถุบต่อสารละลายมีค่าเท่ากับ 1:1 ก่อนการทดสอบค่ากำลังรับแรงอัดตัวอย่างจะผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิห้อง (ตัวอย่างถูกทำทั้งสองอุณหภูมิ) เป็นระยะเวลา 7 วัน

4.7.1 ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อค่ากำลังรับแรงอัดและเวลาการก่อตัวของ จีโอพอลิเมอร์

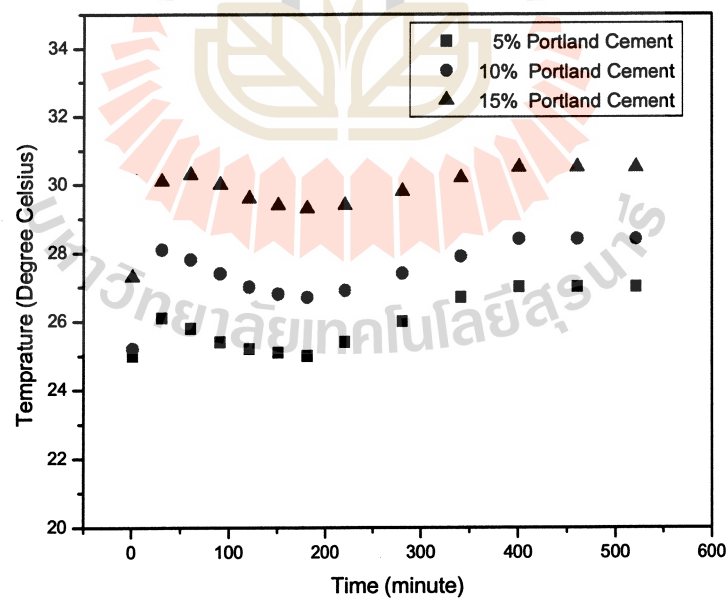
ภาพที่ 4.10 แสดงผลการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังรับแรงอัดของ จีโอพอลิเมอร์หลังการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และบ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 7 วัน ค่า กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เพิ่มขึ้น การเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้แคลเซียมจาก ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เกิดปฏิกิริยากับ ซิลิกาและอะลูมินา (จากแคลไซต์ แกลีน และเถาลอย) ก่อให้เกิดสารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) และแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Calcium aluminosilicate hydrate) คล้ายคลึงกับปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งสารประกอบ แคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตและแคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต จะช่วยส่งเสริมให้จีโอพอลิเมอร์มี กำลังรับแรงอัดสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในการทดลองพบว่าการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เพียงร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก จะส่งผลต่อ กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีค่า ใกล้เคียงกับการบ่มที่อุณหภูมิห้องอาจเป็นผลมาจากอุณหภูมิจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ช่วยบ่ม จีโอพอลิเมอร์จากภายในจึงเร่งการเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ที่บ่มที่อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ จีโอพอลิเมอร์ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสมีความต้องการอุณหภูมิในการบ่มเพียงพอแล้ว ดังนั้น อุณหภูมิจากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์จึงมีผลกับการเกิดปฏิกิริยาค่อนข้างน้อย

นอกจากนี้ปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์เป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) ส่งผลให้อุณหภูมิของจีโอพอลิเมอร์ที่บ่ม ณ อุณหภูมิห้องมีแนวโน้มสูงขึ้นตาม ปริมาณปูนซีเมนต์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 4.11 จากภาพแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิขณะก่อตัวของ จีโอพอลิเมอร์นั้น มีลักษณะคล้ายคลึงกับการคายความร้อนจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ อุณหภูมิที่สูงขึ้นดังกล่าวช่วยให้การเกิดปฏิกิริยาจีโอพอลิเมอร์ไรเซชันเกิดได้ดีขึ้น ส่งผลให้ค่ากำลัง รับแรงอัดของ จีโอพอลิเมอร์สูงขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน ของปูนซีเมนต์ยังส่งผลให้เวลาการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์ลดลงดังแสดงในภาพที่ 4.12

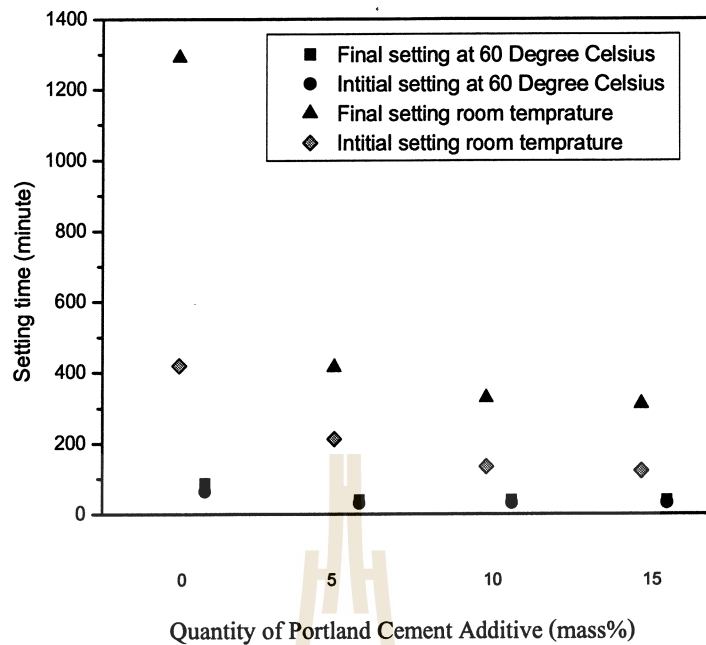
การวัดอุณหภูมิภายในชิ้นงานดังแสดงในภาพที่ 4.11 จะช่วยอธิบายเหตุผลที่ทำให้ จีโอพอลิเมอร์สามารถบ่มที่อุณหภูมิห้องได้โดยการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณต่างๆ พบว่ามีอุณหภูมิจากภายในที่ได้จากปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ช่วยบ่มจีโอพอลิเมอร์ให้สามารถก่อตัว ได้ ซึ่งอุณหภูมิภายในชิ้นงานตัวอย่างที่ได้จะแปรผันตรงกับปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่เติมเข้าไป



ภาพที่ 4.10 แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการแทนที่แคลเซียมไฮดรอกไซด์ด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์



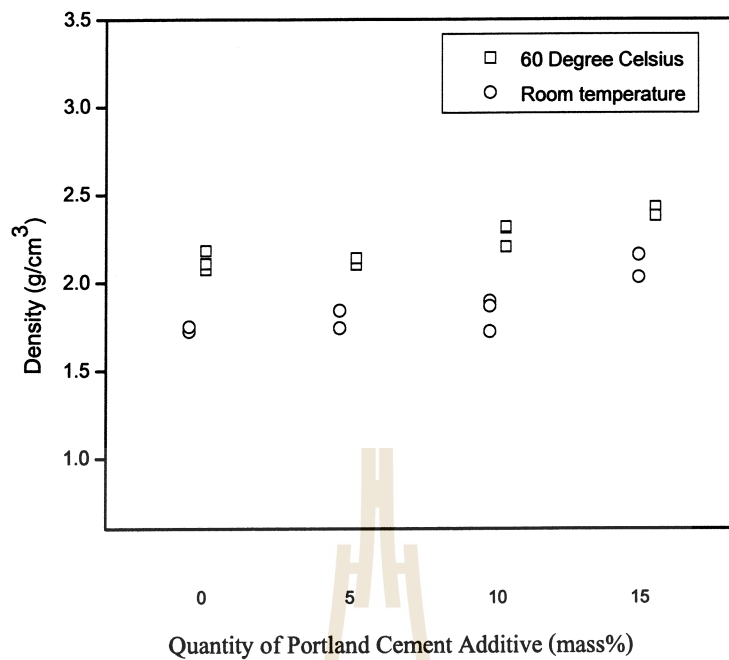
ภาพที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิต่อเวลาในการก่อตัวตามปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์กับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ของจีโอพอลิเมอร์



ภาพที่ 4.12 แสดงผลของความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อแคลไซน์เกาลิน
 etailoyกับเวลาในการก่อตัวจีโอพอลิเมอร์, ---- Initial setting ปูนซีเมนต์ปอร์ต
 แลนด์ที่อุณหภูมิห้อง, --- Final setting ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่อุณหภูมิห้อง

4.7.2 ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์

ผลของการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ต่อความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์แสดง
 ดังในภาพที่ 4.13 พบว่า การเพิ่มขึ้นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้ความหนาแน่นของ
 จีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ทั้งตัวอย่างที่บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และบ่มที่
 อุณหภูมิห้อง เนื่องจากการเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอดโซลานิก (Pozolanic
 reaction) ปฏิกิริยาดังกล่าวทำให้รูพรุนในชิ้นงานลดลง (Anamika Singh. et al., 2015) อย่างไรก็ตาม
 ความหนาแน่นของจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ยังมีค่าต่ำกว่าความหนาแน่นของปูนปอร์ตแลนด์ถึง
 เกือบ 2 เท่า (ความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีค่าเท่ากับ 3.15 g/cm^3) ซึ่งความหนาแน่นที่
 ต่ำนี้นับเป็นข้อได้เปรียบของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ที่เหนือกว่า ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

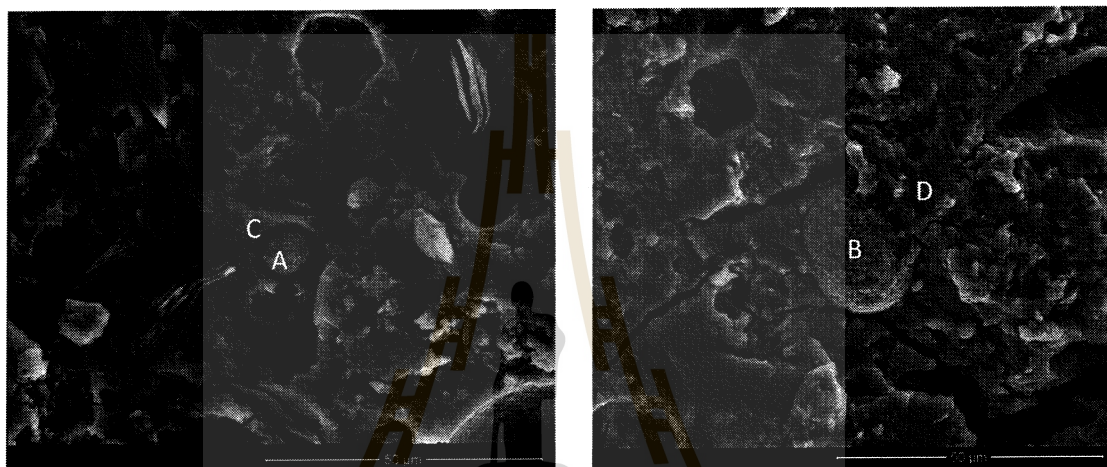


ภาพที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์กับความหนาแน่นของแคลไซน์
เกาตินถ้ำลอยจีโอพอลิเมอร์

4.7.3 ผลของการเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ต่อโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ของจีโอพอลิเมอร์

ภาพที่ 4.14 แสดงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ซึ่งถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy, SEM) ภาพที่ 4.14 (ก) และ 4.14 (ข) แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างจุลภาคของจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่เติม และเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ตามลำดับ พบว่าเมื่อเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์เข้าไปในจีโอพอลิเมอร์ (ภาพที่ 4.14 ข) ส่งผลให้ลักษณะโครงสร้างของ จีโอพอลิเมอร์มีความเป็นเนื้อเดียวกันเพิ่มมากขึ้น และมีเนื้อที่แน่นกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้ทำการเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ เนื่องจากการเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์จะเป็นการเพิ่มปริมาณแคลเซียมที่ช่วยเพิ่มผลผลิตของแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (Calcium silicate hydrate) แคลเซียมอะลูมิโนซิลิเกตไฮเดรต (Calcium aluminosilicate hydrate) อยู่ปะปนกับจีโอพอลิเมอร์ทำให้แคลเซียมบางส่วนเกิดปฏิกิริยากับ ซิลิกาและอะลูมินาจากแคลไซน์เกาตินและถ้ำลอยเกิดเป็นเนื้อเดียวกันเกิดการแทรกซึมระหว่างรอยต่อของเกรนและรูพรุน จึงส่งผลต่อความหนาแน่นและส่งผลต่อการพัฒนาที่ดีขึ้นของจีโอพอลิเมอร์ (Guo et al., 2010) เมื่อพิจารณาจีโอพอลิเมอร์ที่ไม่ได้เติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ (ภาพ 4.14 ก.) ที่กำลังขยาย 3000 เท่าพบว่าโครงสร้างจุลภาคมีลักษณะเนื้อไม่เรียบเนียนและไม่แน่น ยังคงมีถ้ำลอยที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่ในโครงสร้าง สามารถสังเกตได้จากผิวที่เรียบเนียนของถ้ำลอย (A) และรอยต่อระหว่าง

ถ้ำลอย (C) กับ จีโอพอลิเมอร์ ขณะเดียวกันจีโอพอลิเมอร์ที่ทำการเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ ร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก (ภาพ 4.14 ข.) พื้นผิวโครงสร้างจะมีลักษณะเชื่อมประสานและเป็นเนื้อเดียวกันมากกว่า สังเกตได้จากบริเวณถ้ำลอย (B) และรอยต่อระหว่างถ้ำลอยกับ จีโอพอลิเมอร์ที่มีความแนบชิดกันหรือบางส่วนเป็นเนื้อเดียวกัน (D) ถึงแม้ถ้ำลอย (B) จะทำปฏิกิริยาไม่หมดแต่พื้นผิวถูกชะละลายไปบางส่วนแล้วบ่งบอกถึงการเกิดปฏิกิริยาได้ดีกว่าเมื่อทำการเติมปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์



ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 0%

(ก)

ปูนซีเมนต์พอร์ตแลนด์ 15%

(ข)

ภาพที่ 4.14 แสดงโครงสร้างทางจุลภาคของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอยผสมกับแคลไซต์เกลินบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน กำลังขยาย 3000 เท่า

บทที่ 5

สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากถั่วลันเตา โดยใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์และปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในการปรับปรุงความแข็งแรงของวัสดุจีโอพอลิเมอร์

จากการทดลองพบว่าเพื่อให้ได้ความแข็งแรงที่เหมาะสมต่อการใช้งานวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ต้องทำการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมต่อการทำปฏิกิริยาคือ 15 โมลาร์ และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2:1 โดยความแข็งแรงของ จีโอพอลิเมอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น ค่ากำลังรับแรงอัดสูงสุดที่พัฒนาได้มีค่าเฉลี่ย 42 MPa เมื่อแทนที่ถั่วลันเตาด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วนร้อยละ 1:1 โดยน้ำหนัก

เพื่อให้ได้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่มีความแข็งแรงที่เหมาะสมต่อการใช้งานและสามารถบ่มได้ที่อุณหภูมิห้อง จำเป็นต้องผสมถั่วลันเตากับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในสัดส่วนร้อยละ 1:1 โดยน้ำหนัก ร่วมกับเติมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ในปริมาณร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ 15 โมลาร์ และอัตราส่วนสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2:1 วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ให้ค่ากำลังรับแรงอัดเฉลี่ยเท่ากับ 39 MPa หลังบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าที่สูงกว่าค่ากำลังรับแรงอัดของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์นอกจากนี้วัสดุจีโอพอลิเมอร์ที่พัฒนาได้ยังมีน้ำหนักเบากว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ถึงเกือบ 2 เท่า

นอกจากนี้จากการศึกษาหาลักษณะของสารละลายที่เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาพบว่า ในการสังเคราะห์จีโอพอลิเมอร์นั้น ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ โดยเมื่อสัดส่วนของสารละลายโซเดียมซัลเฟตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้นั้นมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าการพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์จำเป็นต้องใช้สารละลายโซเดียมซัลเฟตร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะขาดสารละลายชนิดใดชนิดหนึ่งไม่ได้

การใช้สารละลายชนิดเดียวในการทำปฏิกิริยาส่งผลให้ค่ากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์ลดลงอย่างมีนัยยะ

เวลาในการก่อตัวเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาในการทำงาน งานบางลักษณะต้องการเวลาในการก่อตัวที่รวดเร็ว เช่นงานซ่อมแซมรอยร้าว หรือรอยร้าวต่างๆ แต่งานบางลักษณะต้องการเวลาในการก่อตัวที่ช้าเพื่อให้มีเวลาเพียงพอต่อการทำงาน มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อเวลาในการก่อตัวของวัสดุจีโอพอลิเมอร์ ได้แก่ ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่สูงขึ้นและปริมาณการแทนที่ของแคลไซต์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้เวลาในการก่อตัวมีแนวโน้มที่ลดลง นอกจากนี้ อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้เวลาในการก่อตัวของจีโอพอลิเมอร์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองพบว่า หากขาดสารละลายโซเดียมซิลิเกตหรือสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ตัวใดตัวหนึ่งจะส่งผลให้จีโอพอลิเมอร์ใช้เวลาในการก่อตัวนาน ในทางกลับกัน เมื่อใช้สารละลายทั้งสองร่วมกันโดยสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สัดส่วน 2:1 ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการก่อตัวโดยรวมลดลงเหลือเพียง 52 นาทีเท่านั้น

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงจีโอพอลิเมอร์ที่ได้จากถ่านลอย ให้สามารถนำมาสังเคราะห์เพื่อใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ได้จริง งานวิจัยในอนาคตหากมีความต้องการเพิ่มประสิทธิภาพของจีโอพอลิเมอร์ให้สูงยิ่งขึ้นควรใช้วัสดุดิบที่มีความละเอียดมากยิ่งขึ้น และเพื่อความสะดวกต่อการใช้งานจริงควรทำการศึกษาและพัฒนาส่วนผสมให้อยู่ในรูปแบบผงพร้อมใช้งาน

รายการอ้างอิง

- A. Frenandez-Jimenez, A. Palomo and M. Criado, Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model, Cement and Concrete Research, In Press, Corrected Proof, Available online 21 December 2004.
- A.A. Ikpong, and D.C. Okpala (1992). Strength characteristics of medium workability ordinary Portland cement-rice husk ash concrete. Building and Environment. 7(1):105–111
- Abideng Hawa. M.Eng. (2013).“Properties of metakaolin based geopolymer binder used in repair of concrete pavement”, Princess of Naradhiwas University.
- American Society for Testing and Materials,ASTM C150-00: Standard Specification for Portland Cement,Annual Book of Standards, Philadelphia, 2001, Vol.04.01, 149-155.
- American Society for Testing and Materials, 2011. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM C618, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2012. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM C109 C109M, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2013a. Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM C138 C138M, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2013. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles. ASTM C266, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials,ASTM C311-00, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete,Annual Book of ASTM,Vol. 04.02,p.191-199.

- American Society for Testing and Materials, ASTM C618-00, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4.02, p. 310-313.
- American Concrete Institute, ACI 232.2R-96, 2000, Use of fly ash in concrete, In 2000 ACI Manual of Concrete Practice, Part 2, Michigan, ACI.
- American Society for Testing and Materials, 2013. Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles. ASTM C266, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2012. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). ASTM C109 C109M, Philadelphia, United States of America.
- American Society for Testing and Materials, 2014. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. ASTM D854, Philadelphia, United States of America.
- A.M. Rashad (2013). Alkali-activated metakaolin: a short guide for civil engineer – a overview. *Construction and Building Materials*. 41: 751-765.
- A. Palomo, A. Marcias, M.T. Blanco, and F. Puertas (1992). Physical, chemical and mechanical characterisation of geopolymers. *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement*. 9: 505-511.
- A. Poowancum, E. Nimwinya, and S. Horpibulsuk (2015). Development of Room Temperature Curing Geopolymer from Calcined Water-Treatment-Sludge and Rice Husk Ash. *Calcined Clay for Sustainable Concrete 1*; 291-297.
- Charin Sanawong, Kaitsuda Somna and Wichian Chalee.) 2010. (“ Compressive and Bond Strengths of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete” Department of Civil Engineering, Faculty Engineering, Burapha University
- Charin Seanawong and Wichian Chalee. (2011). Chloride Penetration of Fly Ash-based Geopolymer, *The Journal of KMUTNB.*, Vol. 21, No. 2
- CS. Poon, XC. Qiao ZS. Lin, 2003, Pozzolanic properties of reject fly ash in blended cement pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol.33 Issue 11, p. 1857-1865.

- Davidovits (1994). "Properties of geopolymer Cements." Kiev State Technical University, Ukraine, 131-149.
- Davidovits J. 1999. "Chemistry of geopolymeric systems, Terminology". Proceeding: 2nd International Conference on Geopolymer. France, Paris:9-40.
- E. Nimwinya et al. , "A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash Geopolymer", Journal of Cleaner Production 119 (2016) 131.
- Hardjito, D., S. Wallah, D. M. J. Sumajouw, and B. V. Rangan. "On the Development of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete." ACI Materials Journal, vol. 101, no. 6 (2004) 467–472.
- J.C., Swanepoel, and C.A., Strydom. (2002). "Utilisation of fly ash in geopolymeric material. Applied Geochemistry", 17: 1143-1148.
- J. Davidovits, M. Davidovics, Geopolymer room temperature ceramic matrix for composites, Ceramic Engineering and Science Proceedings 9 (1988), 835-842.
- J. Davidovits, M. Davidovics, Geopolymer: Ultra-high temperature tooling material for the manufacture of advanced composites, 36th International SAMPE Symposium 36 (1991), 1939-1949.
- J. Davidovits, Properties of geopolymer cements, first International Conference on Alkaline Cements and Concretes 1 (1994), 131-149.
- J. G.S. van Jaarsveld, and J.S.J. van Deventer (1996). The potential use of geopolymeric materials to immobilize toxic metal. Minerals Engineering. 10 659-669.
- J. L. Provis, J. S. J. van Deventer, Geopolymers structure processing properties and industrial applications, P.6. Woodhead Publishing Limited, United Kingdom (2009).
- J.L. Provis, Geopolymers and other alkali activated materials why how and what, Materials and Structures 47 (2014), 11–25.
- J.S.G. van Jaarsveld, J.S.J. van Deventer, L. Lorenzer, Factors affecting the immobilization of metals in geopolymerized fly ash, University of Stellenbosch Research Report (1995).

- J.W., Wang, and T.W., Cheng. (2003). Production Geopolymer Material by Coal Fly Ash. Proceeding of the 7th International symposium on East Asian Resource Recycling Technology, 10-14, Tainan, Taiwan.
- J. Xie, J. Yin, J. Chen, J. Xu, Study on the geopolymer based on fly ash and slag, Proceeding of 2009 International Conference on Energy and Environment Technology 3 (2009), 578-581.
- Jumrat S., Chatveera B., 2006, "Influence of Mix Proportions on Physical and Dielectric Properties of Fly Ash-based Geopolymer Mortar", *KMUTT Research and Development Journal*, Vol.33, pp. 145- 162. (In Thai)
- M.D. Safiuddin, J.S. West, Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash, *Cement and Concrete Composites* 32 (2010), 708-717.
- Pattanapong Paisitsrisawat and Ubolluk Rattanasak. (2013). "Effect of Silica Fume on the Properties of Fluidized Bed Combustion (FBC) Fly Ash Geopolymer", *The Journal of Industrial Technology*, Vol. 9. Proceeding of the 7th International symposium on East Asian Resource Recycling Technology, 10 -14, Tainan, Taiwan.
- Palomo, A. Grutzeck, M.W, Blanco, M.T. (2001). "Alkali activated fly ashes cement for the future." *Cem. Concr. Res.* 29 (1999) 1323-1329.
- Palomo A., Macias A., Blanco M.T., Puertas F., 1992, "Physical, chemical and mechanical characterization of geopolymers", *Proceedings of the 9th International Congress on the Chemistry of Cement*, New Delhi, India, 5, pp. 505-511.
- P. Chindaprasit, P. D. Silva, K. S. Crentsil, S. Hanjitsuwan, Effect of SiO₂ and Al₂O₃ on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems, *Journal of Material Science* 47 (2012), 4876-4883.
- P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo and J. S. J. van Deventer, Geopolymers technology: the current state of the art, *Journal of Materials Science* 42 (2007), 2917-2933

- P.G. Malone, T. Kirkpatrick C.A. Randall, Potential applications of alkali-activated aluminosilicate binders in military operations, Report WES/MP/GL-85-15 (1986).
- K. Ganesan, K. Rajagopal, K. Thangavelu, Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete, *Construction and Building Materials* 22 (2007), 1675-1683.
- K. Svinning, Design and manufacture of Portland cement application of sensitivity analysis in exploration and optimization part1 exploration, *Chemometrics and intelligent laboratory systems* 84 (2006), 177-187.
- L.Jiang, Z. Liu, Y. Ye, 2004, Durability of concrete incorporating large volumes of low-quality fly ash, *Cement and Concrete Research*, In Press, Uncorrected Proof, Available online 4 February 2004
- N. Bouzoubaa B. Fournier, 2003, Optimization of fly ash content in concrete: Part 1: Non air entrained made without superplasticizer, *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, Issue 7, p. 1029-1037.
- PK. Kolay, DN. Singh, 2001, Physical, chemical, mineralogical, and thermal properties of cenospheres from an ash lagoon, *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, Issue 4, p. 539-542
- R. Siddique, 2003, Effect of fine aggregate replacement with Class F fly ash on the mechanical properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.33, Issu 4 p.539-547.
- SV.Vassilev, R.Menendez, M. Diaz-Somoano and MR. Martinez-Tarazona, 2004, Phase-mineral and chemical composition of fly ashes as a basis for their multicomponent utilization. 2. Characterization of ceramic cenosphere and salt concentrates, *Fuel*, Vol. 83, p. 585-603.
- S. Homwuttiwong, V. Sirivivatnanon, 2004, Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar, *Cement and Concrete Research*, 34, 1087-1092

- S. Abhilash, C.K. Singh, A.K. Sharma, Study of the properties of concrete by partial replacement of ordinary Portland cement by rice husk ash, *International Journal of Earth Sciences and Engineering* 4[6] (2011), 965-968.
- T.W. Cheng, J.P. Chiu, Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag, *Minerals Engineering* 16 (2003), 205–210.
- V. Kannan, K. Ganesan, Chloride and chemical resistance of self-compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin, *Construction and Building Materials* 51 (2014), 225-234.
- กนกวรรณ ปันเขตร และ อุบลลักษณ์ รัตนศักดิ์ “ผลของสารผสมเพิ่มต่อสมบัติจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าลอย”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 33 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2533
- จิรัฐดี บรรจงศิริ, “การศึกษากำลังรับแรงอัดของจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าปาล์มน้ำมัน”, การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9
- ปริญญา จินดาประเสริฐ, อินทรชัย หอวิจิตร (2528). “การศึกษาปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ผสมซีเถ้าลอย แม่-เมาะ”. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ปริญญา จินดาประเสริฐ (2549), “เถ้าลอยในงานคอนกรีต” สมาคมคอนกรีตไทย
- รัฐพล สมณา และ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล (2554), “การใช้เถ้าขานอ้อยบดละเอียดเพื่อปรับปรุงกำลังอัด การซึมผ่านน้ำและความต้านทาน คลอไรด์ของคอนกรีตที่ใช้มวลรวมหยาบจากการย่อยเศษคอนกรีตเก่า”, วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ปีที่ 34 ฉบับที่ 4
- สกลวรรณ ห่านจิตสุวรรณ, ธนากร ภูเงินขา และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2015). “สมบัติของเถ้าลอย จีโอ โพลิเมอร์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์” วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรม ปี ที่ 9 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2556
- สำเร็จ รักช้อน และ วิโรจ พรหมเงิน (2552). “การพัฒนาวัสดุจีโอพอลิเมอร์จากเถ้าแกลบและเถ้าขานอ้อย” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร กรุงเทพมหานคร
- อนนท์ ป้อมประสิทธิ์. (2550), “ปอชโซลาน”. กรมกองฟิสิกส์วิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.
- อนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ และ ปริญญา จินดาประเสริฐ (2005). การศึกษาสารจีโอโพลิเมอร์จาก เถ้าลอยและดินขาวเผา. การประชุมวิชาการคอนกรีตและจีโอโพลิเมอร์แห่งชาติ. 1:153-161.



ภาคผนวก ก

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างเรียน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Sustainable Cement Replacement Material From a Coal-Fired Power Plant Waste

Nuttapong Phachan, Suranaree University of Technology, Thailand
Siriwan Chokkha, Suranaree University of Technology, Thailand
Anurat Poowancum, Suranaree University of Technology, Thailand

The Asian Conference on Sustainability, Energy & the Environment 2017
Official Conference Proceedings

Abstract

Electrical energy is an important in a daily life. Coal is a primary fuel for electricity production. The waste from the coal-fired electricity generation is a fly ash. The numerous fly ash is a low quality fly ash (LQFA). LQFA is a low reactivity ash, and is a hazardous waste. Normally, LQFA is stored in the landfills. The heavy metals can leach from the stored LQFA into an environment, which is a serious problem. The sustainable ways to solve the problem is to utilize LQFA as a valuable material.

Although, cement is widely used in the construction work, it is an environmental unfriendly material. The high quantities of carbon dioxide gas are emitted from the cement producing process. Geopolymer is expected to be a sustainable cement replacement material due to its manufacturing process does not emit a carbon dioxide gas. Furthermore, geopolymer can be synthesized from the various types of waste materials

The aim of this work is to develop the geopolymer by using the LQFA and a calcined clay (CC) as a precursor. The results show that the compressive strength of LQFA-CC-geopolymer is higher than that of the commercial cement. The compressive strength of LQFA-CC-geopolymer is increased with increasing the concentration of NaOH and the ratio of Na_2SiO_3 to NaOH solution. The knowledge of this work opens an opportunity to utilize the LQFA as a cement replacement material to reduce an environmental impact of the coal-fired power plant waste.

Keywords: Coal-fired electricity waste, Cement replacement, Geopolymer, Fly ash, Calcined clay

iafor

The International Academic Forum
www.iafor.org

Introduction

Portland Cement (PC) is one of the most used materials in the world. However, PC has negative environmental impacts because its production process requires high energy consumption and release a lot of carbon dioxide gas. The latter is the main cause of the global warming. Recently, several researchers have been investigating for a sustainable cement replacement material. Geopolymer is one of the most interested alternatives.

Geopolymer is an environmental friendly material, and, is expected to be used as the sustainable cement replacement materials. Because, the geopolymer production process consumes low energy and does not emit carbon dioxide gas to an environmental. Geopolymer can be synthesized by using the aluminosilicate materials mix with alkali hydroxide and/or alkali silicate. The aluminosilicate materials are the silica (SiO_2) and alumina (Al_2O_3) rich materials. Variety of aluminosilicate materials are used for synthesized geopolymer such as calcined clay (CC), fly ash, bottom ash, and water treatment sludge (Ekkasit et al., 2016).

Fly ash is the waste from the coal-fired power plant, and is mainly used as the pozzolanic materials for the building applications. However, not all of fly ashes are suitable for construction applications. The properties of fly ashes depend on the fuel nature and the furnace used (Wesche, 1991). High quality fly ash is a highly desirable commodity in the construction industry, because, it is a high reactivity ash. High quality fly ash is obtained from high quality coal (anthracite and bituminous) with high temperature (around 1100 to 1700 °C) combustion system. Morphology of the high quality fly ash is mainly vitreous spherical particles. However, the numerous fly ash is the low quality fly ash (LQFA). Wesche (1991) has described that LQFA is a low reactivity ash, and, has a high percentage of irregular crystalline particles. LQFA is a hazardous waste, it is undesirable for building applications. Normally, LQFA is stored in the landfills. The heavy metals can leach from the stored LQFA into an environment, which is a serious problem. In addition, the number of LQFA trend to significantly increase year by year. The sustainable ways to solve the problem is to treat LQFA as a valuable material, that is geopolymer. Although, several researchers study on the development of geopolymer from fly ash, there are a few work reports on the development of geopolymer from LQFA.

The aim of this work is to develop a geopolymer material from LQFA blends with a calcined clay (CC). The effect of LQFA/CC ratios, concentration of sodium hydroxide (NaOH) and the ratios of sodium silicate (Na_2SiO_3) to sodium hydroxide on compressive strength of the LQFA-CC geopolymer are examined. This research will enable LQFA traditionally destined for landfills to be used in a sustainable manner as a precursor in geopolymer, which is significant from engineering and environmental point of view.

Materials and methods

Precursor preparation

The LQFA was passed through a sieve (number 120 mesh) and oven-dried at 100 °C for 24 hours to remove the impurities in the LQFA. Kaolinite clay from Ranong province, Thailand was milled by mortar and passed through a sieve (number 120 mesh) before being calcined at 600 °C for 3 hours to obtain CC powder.

Sample preparation

Sodium hydroxide (NaOH) pellets and distilled water were mixed to obtain a concentration of 5, 10 and 15 M, then allowed to cool down at a room temperature. The alkali activator solution was prepared by mixing sodium silicate (Na_2SiO_3) solution with NaOH solution. The ratios of Na_2SiO_3 to NaOH were 0:1, 0.5:1, 1:1, 1.5:1, 2:1 and 1:0 by weight. The mixed solutions were stored for 24 hours prior to use. Chemical composition of Na_2SiO_3 solution consists of $\text{Na}_2\text{O} = 16.3\%$, $\text{SiO}_2 = 34.2\%$ and $\text{H}_2\text{O} = 49.5\%$.

LQFA and CC powder were mixed in the various LQFA/CC ratios of 100:0, 50:50, 40:60, 30:70, 0:100 by weight. The mixed powder was mixed with an alkali activator solution by a mortar at a solid to liquid ratio of 1.0. Then, the slurry mixture was poured into a 50 mm x 50 mm x 50 mm steel mold and compacted as described in ASTM C109 (2002). The samples along with the molds were sealed with vinyl sheet to prevent moisture evaporation during curing at 60 °C for 7 days.

Characterization techniques

Morphology and mineral compositions of LQFA were evaluated by scanning electron microscope (SEM, JOEL JSM-6010LV) and X-ray diffraction (XRD, Bruker D5005) with CuK_α radiation, respectively. X-ray fluorescence (XRF, HORIBA XGT-5200) was used to analyze chemical compositions of LQFA and CC. Density and compressive strength of the 7 days cured samples were measured following ASTM C138 (2009) and ASTM C109 (2002), respectively.

Results and Discussion

Chemical compositions of LQFA and CC are seen in table 1. Main chemical compositions of LQFA and CC are SiO_2 and Al_2O_3 .

Table 1. Chemical compositions of LQFA and CC.

| Raw materials | Chemical compositions (weight%) | | | | | | | |
|---------------|---------------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|--------------|--------------|-------------------------|-------|
| | Al_2O_3 | SiO_2 | K_2O | Na_2O | CaO | MgO | Fe_2O_3 | Etc. |
| LQFA | 19.68 | 33.19 | 2.29 | 2.40 | 11.93 | 4.43 | 10.64 | 15.44 |
| CC | 48.48 | 49.40 | 0.99 | 0.08 | 0.01 | 0.12 | 0.67 | 0.25 |

The X-ray diffractograms of LQFA is seen in Figure 1, crystalline phase of SiO_2 and CaSO_4 are the main compositions. Figure 2 shows SEM micrograph of LQFA. Almost all particles are irregular in shape. The XRD and SEM results demonstrate that the used fly ash is in the type of LQFA.

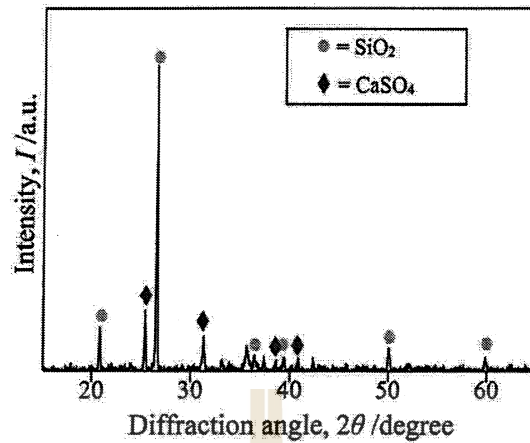


Figure 1 X-ray diffraction (XRD) spectra of LQFA

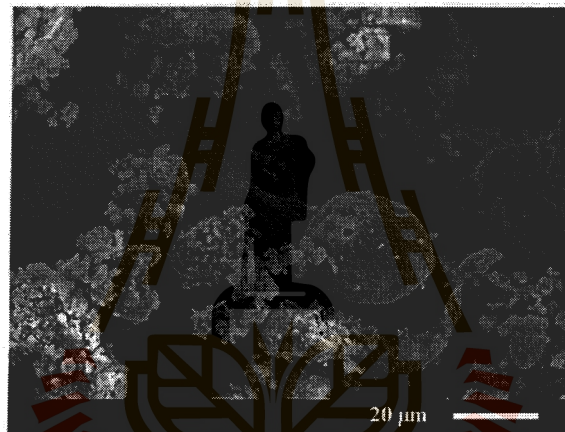


Figure 2 SEM image of LQFA; almost all particles are irregular in shape.

Figure 3 illustrates that by using LQFA as a precursor alone, geopolymer has low strength. Because, LQFA has low reactivity with the alkali activator solution. Compressive strength of LQFA-geopolymer is around 10 MPa, is lower than the minimum requirement for PC of 19 MPa (ASTM C150, 2003). Compressive strength of CC-geopolymer is around 34 MPa, which is higher than that of LQFA-geopolymer. Because, CC has high reactivity with the alkali activator solution (Zuhua et al., 2014). Therefore, compressive strength of LQFA-geopolymer is improved via replace LQFA by CC. The maximum strength is obtained at LQFA/CC ratio of 50:50 by weight, and is around 42 MPa. However, strength of LQFA-CC-geopolymer is reduced when LQFA is replaced by CC over 50 wt%. The role of the LQFA/CC ratio on the developed strength is explained in the term of the Si/Al ratios. Table 2 presents Si/Al ratios for various LQFA/CC ratios, which were calculated from the chemical compositions of the LQFA and CC (Table 1), as well as the Na_2SiO_3 solution. The Si/Al ratio is an importance factor for the developed strength of geopolymer. The

suitable Si/Al ratios for the cement replacement materials were reported as approximately 3 - 4 (Chindapasirt et al., 2012 and Abdullah et al., 2011). Although, CC has high reactivity with the alkali activator solution, Si/Al ratio is reduced with increasing of CC replacement.

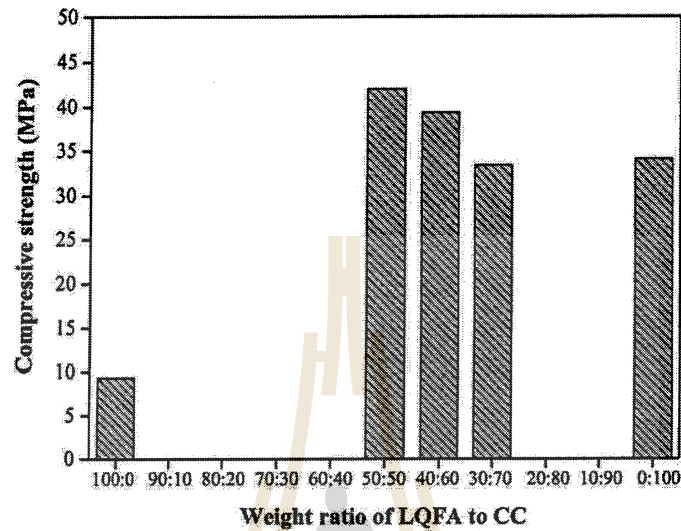


Figure 3 compressive strength of the geopolymers with different LQFA/CC ratios; all samples used NaOH 15 M mixed with Na_2SiO_3 ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio = 2:1), as the alkali activator solution.

Table 2. Calculation of Si/Al ration in the different replacement of LQFA by CC

| Compositions (weight %) | | Si/Al ratios |
|-------------------------|-----|--------------|
| LQFA | CC | |
| 100 | 0 | 2.4 |
| 50 | 50 | 1.6 |
| 40 | 60 | 1.5 |
| 30 | 70 | 1.4 |
| 0 | 100 | 1.3 |

Figure 4 and Figure 5 demonstrate that the high compressive strength of LQFA-CC-geopolymer is obtained by using high concentration of NaOH (Figure 4) with high $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios (Figure 5). In addition, figure 5 shows that both of NaOH and Na_2SiO_3 are required for obtaining the high strength LQFA-CC-geopolymer. By using NaOH or Na_2SiO_3 as the alkali activator solution alone, LQFA-CC-geopolymer has low strength. Strength of geopolymer is developed via geopolymerization process. The role of NaOH and Na_2SiO_3 in the geopolymerization process is the dissolvent and the binder, respectively. High concentration of NaOH promotes dissolution of fly ash, as well as, increases the concentration of Al^{3+} and Si^{4+} ions (Ubolluk and Prinya, 2009). The linkage between Al^{3+} and Si^{4+} ions in the geopolymerization process is enhanced by increasing amount of Na_2SiO_3 which act as a binder. By using 15 M of NaOH with $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio is 2:1, compressive strength of LQFA-CC-geopolymer is around 42 MPa, which is higher than the minimum requirement of PC.

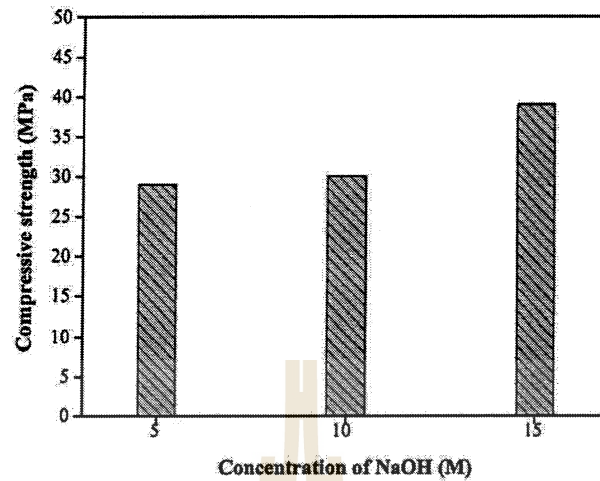


Figure 4 compressive strength of the geopolymers with different concentration of NaOH. All samples have the ratio of LQFA/CC and $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ is 50:50 and 1.5:1, respectively.

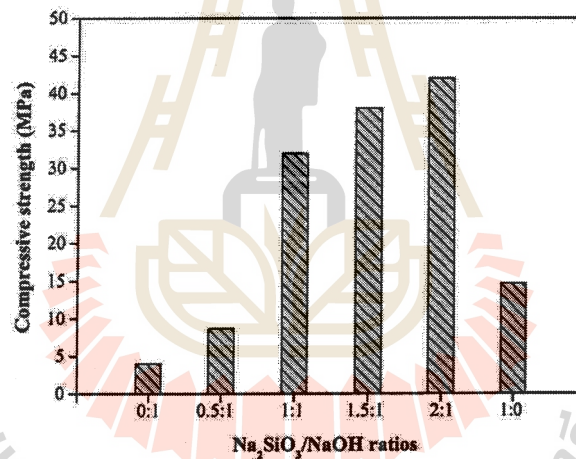


Figure 5 compressive strength of LQFA-CC-geopolymer with different $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratios; the LQFA/CC ratio of 50:50 and NaOH 15 M are used for all samples.

Density of material is important for a structure cost. Density of all samples in the present work are around 1.12 to 2.18, which are lower than that of PC. The density of PC is approximately 3.15 g/cm^3 (ASTM C138, 2009; ASTM C185, 2008; ASTM C595/C595M, 2013). Low density is an advantage of the LQFA-CC-geopolymer over PC, which can be used for development of the lightweight materials. The outcome of the present work opens an opportunity to utilize LQFA as the sustainable cement replacement materials.

Conclusions

In the present work, a sustainable cement replacement material was developed by using a coal-fired power plant waste, i.e., low quality fly ash (LQFA) blend with a calcined clay (CC), as the precursor. LQFA has low reactivity with the alkali activator solution. Reactivity of the precursor is enhanced by blend LQFA with CC. Strength of the LQFA-CC-geopolymer is higher than the minimum requirement of Portland cement (PC) around 2 times after curing at 60 °C for 7 days. By using NaOH or Na₂SiO₃ as the alkali activator alone, LQFA-CC-geopolymer has low strength. The high concentration of NaOH solution and the sufficiency of Na₂SiO₃ binder are required to obtain the high strength LQFA-CC-geopolymer. Density of the LQFA-CC-geopolymer is significantly lower than that of PC. The knowledge in this work opens an opportunity to convert the hazardous waste to be the useful product, i.e., a sustainable cement replacement material.

Acknowledgements

This research was supported by the Suranaree University of Technology.



References

- Abdullah, M. M. A., Hussin, K., Bnhussain, M., Ismail, K. N., & Ibrahim, W. M. W. (2011). Mechanism and chemical reaction of fly ash geopolymer cement-A review. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 6(1), 35-44.
- ASTM C109, (2002). Standard test method of compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50 mm] cube specimens). In: *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 04. 01.
- ASTM C138, (2009). Standard test of method for unit weight of mortar. In: *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 04. 01.
- ASTM C150, (2003). Standard specification for Portland cement. In: *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 04. 02.
- ASTM C185, (2008). Standard test method for air content of hydraulic cement mortar. In: *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 04. 01.
- ASTM C595/C595M, (2013). Standard specification for blended hydraulic cements. In: *Annual Book of ASTM Standard*. Vol. 04. 02.
- Chindaprasirt, P., De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., & Hanjitsuwan, S. (2012). Effect of SiO_2 and Al_2O_3 on the setting and hardening of high calcium fly ash-based geopolymer systems. *Journal of Materials Science*, 47, 4876-4883.
- Ekkasit, N., Weerachai, A., Suksun, H., Tanakorn, P. N., & Anurat, P. (2016). A sustainable calcined water treatment sludge and rice husk ash geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, 119, 128-134.
- Ubolluk, R., & Prinya, C. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 22, 1073-1078.
- Wesche, K. (1991). *Fly Ash in Concrete Properties and Performance*. London: E&FN Spon.
- Zuhua, Z., Hao, W., Yingcan, Z., Andrew, R., John, L. P., & Frank, B. (2014). Using fly ash to partially substitute metakaolin in geopolymer synthesis. *Applied Clay Science*, 88-89, 194-201.
- Contact email: anurat@sut.ac.th



ภาคผนวก ข

วิธีการคำนวณสัดส่วนระหว่างชดิกอนต่ออะตุมิเนียม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิธีคำนวณสัดส่วนระหว่างซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม

กำหนดให้ใช้ปริมาณเถ้าลอยต่อแคลไซต์เกาลินเป็น 50:50 ปริมาณผงจีโอพอลิเมอร์ต่อสารละลาย 1:1 สารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2:1 ในสารละลายโซเดียมซิลิเกตประกอบไปด้วย $\text{Na}_2\text{O} = 16.3 \text{ wt.}\%$, $\text{SiO}_2 = 34.2 \text{ wt.}\%$ และ $\text{H}_2\text{O} = 49.5 \text{ wt.}\%$

| วัตถุดิบ | องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ โดยน้ำหนัก) | | | | | | | | | | |
|-------------------|---------------------------------------|----------------|----------------------|-----------------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------|---------------|--------------|------|
| | Al_2O_3 | SiO_2 | K_2O | Na_2O | CaO | MgO | Fe_2O_3 | TiO_2 | SO_3 | CdO | Etc. |
| แคลไซต์ เกาลิน | 48.48 | 49.40 | 0.99 | 0.08 | 0.01 | 0.12 | 0.68 | 0.03 | 0.04 | - | 0.17 |
| เถ้าลอย | 19.68 | 33.19 | 2.29 | 2.40 | 11.93 | 4.43 | 10.65 | 0.76 | 3.86 | 9.76 | 1.05 |

ขั้นตอนที่ 1 การหาปริมาณซิลิกาจากผงจีโอพอลิเมอร์

ในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ 100 กรัม มีปริมาณเถ้าลอย 50 กรัม และแคลไซต์เกาลิน 50 กรัม ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned}
 \text{ซิลิกาจากเถ้าลอย} &= \left(\frac{\text{ปริมาณผงเถ้าลอย}}{\text{ผงจีโอพอลิเมอร์ทั้งหมด}} \right) \times \left(\frac{\text{ปริมาณซิลิกาใน}}{\text{เถ้าลอย}} \right) \\
 &= \left(\frac{50}{100} \right) \times 33.19 \\
 &= 16.60 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ซิลิกาจากแคลไซต์เกาลิน} &= \left(\frac{\text{ปริมาณผงแคลไซต์เกาลิน}}{\text{ผงจีโอพอลิเมอร์ทั้งหมด}} \right) \times \left(\frac{\text{ปริมาณซิลิกาใน}}{\text{แคลไซต์เกาลิน}} \right) \\
 &= \left(\frac{50}{100} \right) \times 49.40 = 24.70 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 2 การหาปริมาณซิลิกาจากสารละลาย

ในสารละลายทั้งหมดประกอบไปด้วยโซเดียมซิลิเกต

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{\text{ปริมาณโซเดียมซิลิเกต}}{\text{ปริมาณสารละลายทั้งหมด}} \right) \times 100 \\
 &= \left(\frac{2}{3} \right) \times 100 \\
 &= 66.67\%
 \end{aligned}$$

หากใช้ผงจีโอพอลิเมอร์ทั้งหมด 100 กรัม สารละลายที่ใช้มีน้ำหนัก 100 กรัม จะมีจะมีโซเดียมซิลิเกตในสารละลาย

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{66.67}{100} \right) \times 100 \\
 &= 66.67 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาณซิลิกาที่มาจากโซเดียมซิลิเกตมีปริมาณเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 &= \left(\frac{34.2}{100} \right) \times 66.67 \\
 &= 22.81 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

ปริมาณซิลิกาทั้งหมดในส่วนผสมจีโอพอลิเมอร์มีปริมาณเท่ากับ

$$\begin{aligned}
 &= \text{SiO}_2(\text{แก้วลอย}) + \text{SiO}_2(\text{แคลไซต์ไฮดรอกไซด์}) + \text{SiO}_2(\text{สารละลาย}) \\
 &= 16.60 + 24.70 + 22.81 \\
 &= 64.11 \text{ กรัม}
 \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 3 การหาปริมาณอะลูมินารวมในวัสดุจีโอพอลิเมอร์

ในวัสดุจีโอพอลิเมอร์ 100 กรัม มีปริมาณแก้วลอย 50 กรัม และแคลไซต์ไฮดรอกไซด์ 50 กรัม ดังนั้น

$$\text{อลูมินาจากแก้วลอย} = \left(\frac{\text{ปริมาณแก้วลอย}}{\text{ปริมาณผงจีโอพอลิเมอร์}} \right) \times \left(\frac{\text{ปริมาณอะลูมินา}}{\text{ในแก้วลอย}} \right)$$

$$= \left(\frac{50}{100} \right) \times 19.68$$

$$= 9.84 \text{ กรัม}$$

$$\text{อะลูมิเนียมจากแคลไซต์} = \left(\frac{\text{ปริมาณแคลไซต์}}{\text{ปริมาณผงซีโอพอลิเมอร์}} \right) \times \left(\text{ปริมาณอะลูมิเนียมในถ้ำลอย} \right)$$

$$= \left(\frac{50}{100} \right) \times 48.48$$

$$= 24.24 \text{ กรัม}$$

ขั้นตอนที่ 4 การหาปริมาณสัดส่วนซิลิกอนต่ออะลูมิเนียม

ปริมาณซิลิกอนทั้งหมดในวัสดุซีโอพอลิเมอร์

$$= \left(\frac{\text{น้ำหนักโมเลกุลของธาตุซิลิกอน}}{\text{น้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบซิลิกา}} \right) \times \left(\text{น้ำหนักซิลิการวมในวัสดุซีโอพอลิเมอร์} \right)$$

$$= \left(\frac{28.1}{60} \right) \times 64.11$$

$$= 30.02$$

ปริมาณอะลูมิเนียมทั้งหมดในวัสดุซีโอพอลิเมอร์

$$= \left(\frac{\text{น้ำหนักโมเลกุลของธาตุอะลูมิเนียม}}{\text{น้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบอะลูมินา}} \right) \times \left(\text{น้ำหนักอะลูมินารวมในวัสดุซีโอพอลิเมอร์} \right)$$

$$= \left(\frac{54}{102} \right) \times 34.08$$

$$= 18.04$$

ดังนั้นจะหาสัดส่วนระหว่าง Si/Al

$$= \frac{30.02}{18.04} = 1.6$$

ประวัติผู้เขียน

นายณัฐพงศ์ ผาจันทร์ เกิดเมื่อวันที่ 14 พฤศจิกายน พ.ศ. 2531 สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาจากบ้านศรีเชียงใหม่ อำเภอศรีเชียงใหม่ จังหวัดหนองคาย เมื่อปี พ.ศ. 2544 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาสายสามัญ จากโรงเรียนท่าบ่อ อำเภอท่าบ่อ จังหวัดหนองคาย เมื่อปี พ.ศ. 2550 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมเซรามิก จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปี พ.ศ. 2555 ภายหลังสำเร็จการศึกษาแล้วได้เข้าทำงานที่บริษัท สหโมเสคอุตสาหกรรม จำกัด (มหาชน) จากนั้นศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขณะที่ศึกษาอยู่ได้รับการตีพิมพ์ เผยแพร่บทความทางวิชาการ โดยมีรายละเอียดปรากฏในภาคผนวก ก.

